

**PENGARUH PROSES PELENGKUNGAN DAN  
PEMANASAN GARIS PELAT BAJA KAPAL  
AISI E 2512 TERHADAP NILAI KEKERASAN  
DAN LAJU KOROSI**

*INFLUENCE OF BENDING PROCESS AND LINE HEATING  
OF SHIP STEEL PLATE AISI E 2512 ON HARDNESS  
VALUE AND CORROSION RATE*



**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik Mesin  
pada program Pascasarjana Universitas Diponegoro**

**Disusun Oleh :**

**SULAIMAN  
L4E 007 018**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN  
PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS DIPONEGORO SEMARANG  
2010**



**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH PROSES PELENGKUNGAN DAN PEMANASAN  
GARIS PELAT BAJA KAPAL AISI E 2512 TERHADAP NILAI  
KEKERASAN DAN LAJU KOROSI**

Disusun oleh:

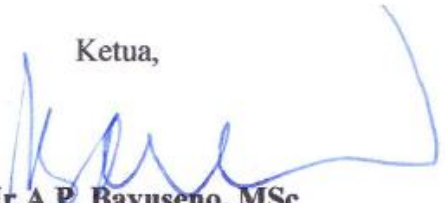
**SULAIMAN**  
**NIM. L4E 007 018**

**Program Studi Magister Teknik Mesin**  
**Program Pascasarjana Universitas Diponegoro**


Menyetujui  
Tim Pembimbing

Tanggal, 18 Agustus 2010

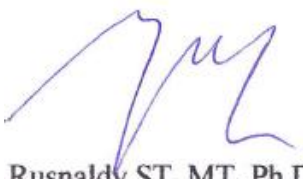
Ketua,

  
**Dr. Ir.A.P. Bayuseno, MSc**  
**NIP. 196205201989021001**

Pembimbing

  
**Dr. Ir.A.P. Bayuseno, MSc.**  
**NIP. 196205201989021001**

Co. Pembimbing

  
**Rusnaldy ST, MT, Ph.D.**  
**NIP. 197005201999031001**

**PENGARUH PROSES PELENGKUNGAN DAN PEMANASAN GARIS  
PELAT BAJA KAPAL AISI-E 2512 TERHADAP  
NILAI KEKERASAN DAN LAJU KOROSI**

**Sulaiman  
L4E 007 018**

**ABSTRAK**

Pelat lambung kapal merupakan komponen terbesar yang mempunyai resiko kerusakan tinggi akibat korosi, sehingga membutuhkan biaya pemeliharaan dan perbaikan yang tidak sedikit. Korosi ini dapat terjadi selama proses produksi pelat lambung kapal, yang mengalami berbagai macam perlakuan antara lain : pemotongan, pelengkungan dan pengelasan. Untuk mengurangi resiko kerusakan karena korosi tersebut, maka pada saat proses produksi pelat lambung kapal diperlukan upaya pencegahan agar terhindar dari kerusakan lebih lanjut.

Proses pelengkungan pelat baja lambung kapal sangat dibutuhkan untuk membentuk bodi kapal sesuai dengan gambar rencana garis (*body plan*) agar diperoleh bentuk badan kapal yang *streamlines*. Proses *pelengkungan* ini dapat dilakukan dengan metode dingin dan pemanasan garis (*line heating*). Metode *pelengkungan line heating* sangat menguntungkan secara ekonomis, namun memiliki beberapa kendala terutama pada pengaturan suhu pemanasan yang tepat dalam proses pemanasan garis. Pemanasan yang diberikan saat pemanasan garis dapat merubah struktur mikro pelat, dan nilai kekerasan pelat dapat berubah, hal ini juga mempengaruhi laju korosi pelat baja terutama setelah digunakan pada media air laut yang sangat korosif.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh pelengkungan dingin dan pemanasan garis terhadap perubahan: struktur mikro, nilai kekerasan material dan juga laju korosi yang terjadi. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen laboratorium. Benda uji (spesimen) yang digunakan adalah pelat baja AISI-E 2512, yang diperlakukan pelengkungan dingin dan pemanasan garis menggunakan tiga macam radius pelengkungan yaitu R.67, R.100 dan R.133. pengujian yang dilakukan terhadap spesimen adalah pengujian struktur mikro, pengujian kekerasan, dan pengujian korosi dengan menggunakan media air laut dengan salinitas 37 ‰.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju korosi terbaik pada proses *bending* dingin adalah 0,126 mm/tahun terjadi pada proses bending R 67. Sedangkan laju korosi terbaik pada proses pemanasan garis adalah 0,087 mm/tahun terjadi pada proses bending R 67. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa kekerasan tertinggi pada proses *bending* dingin dan proses pemanasan garis adalah 83,36 HRB dan 80,38 HRB terjadi pada proses bending R 133. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa fasa pada proses *bending* dingin dan proses pemanasan garis adalah ferrite dan pearlite.

Kata kunci : Proses bending, pemanasan garis, kekerasan dan laju korosi

**INFLUENCE OF BENDING PROCESS AND LINE HEATING  
OF SHIP STEEL PLATE AISI E 2512 ON HARDNESS  
VALUE AND CORROSION RATE**

**Sulaiman  
L4E 007 018**

**ABSTRACT**

*Hull plate is the largest component of which has a high risk of damage due to corrosion, thus requiring repairs and maintenance costs are not small. This corrosion can occur during the production process of hull plates, which experienced a wide range of treatments including: cutting, bending and welding. To reduce the risk of damage due to corrosion, hence at the time of ship hull plate production process of prevention efforts required to avoid further damage.*

*The process of bending steel hull plate was needed to form a ship body in accordance with the body plan in order to obtain the hull form that streamlines. This banding process can be done with the cold and hot working. Bending line heating method is very beneficial economically, but has some constraints, especially in setting the proper heating temperature in the line heating process. Line heating process can affect the microstructure of the plate, and the hardness of the plate. Line heating process also affects the corrosion rate of steel plate used in the media especially after the highly corrosive sea water.*

*This research aims is to analyze the effect of bending process and lines heating of ship steel plate AISI E 2512 to changes in microstructure, hardness value of materials and also the corrosion rate. The method used is the method of experiments research. The specimen used is steel plate AISI-E 2512, which treated the bending process and lines heating using three kinds of bending radius R.67, R.100 and R.133. Tests conducted on the test specimen is micro structure, hardness testing, and corrosion test using sea water media with salinity 37 ‰.*

*The results showed that the corrosion rate of the best in the bending process was 0.126 mm/year occur in the bending process R 67. Whereas the best corrosion rate in the line heating process is 0.087 mm/year occur in the bending process R 67. Hardness testing results showed that the highest hardness in the bending process and the line heating process is 83.36 HRB and 80.38 HRB occur in the bending process R 133. The test results showed that the phase microstructure in the bending process and the line heating process is ferrite and pearlite.*

*Key words: bending process, line heating, Hardness value, and Corrosion rate,*

## **PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS**

Tesis S2 yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Diponegoro, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada pengarang dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Universitas Diponegoro.

Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seijin pengarang dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya. Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh tesis haruslah seijin Direktur Program Pascasarjana Universitas Diponegoro.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1.Latar Belakang

Pelat baja untuk lambung kapal merupakan komponen terbesar investasi kapal niaga yaitu sebesar 40% (Biro Klasifikasi Indonesia, 2006), dan memiliki resiko kerusakan tinggi akibat pengkaratan, sehingga membutuhkan biaya pemeliharaan dan perbaikan yang tidak sedikit. Untuk mengurangi resiko pengkaratan saat pelat lambung kapal di produksi merupakan langkah awal atau preventif yang harus dilakukan agar terhindar dari pengkaratan dan kerusakan lebih lanjut. Pengkaratan ini dapat timbul selama proses produksi lambung kapal, yang mengalami berbagai macam perlakuan antara lain : pemotongan, pembengkokan dan pengelasan. Proses perlakuan ini akan mempengaruhi kualitas pelat baja terutama akibat pemberian tekanan (*stress*) dalam proses *bending* pelat, dan *bending line heating* dalam proses pemanasan dan pendinginan.

Proses *bending* dengan metode *line heating* , dimana satu sisi pelat searah garis sejajar diberi panas (*line heating* atau pemanasan secara garis) dan dilakukan pendinginan dengan menggunakan air. Namun sejauh mana hal ini dapat mempengaruhi kekuatan pelat yang terlihat dari perubahan struktur mikro pelat baja lambung kapal belum banyak diketahui.

Konstruksi bagian lambung kapal harus kuat agar dapat menahan beban dari berat kapal sendiri maupun muatan, dan juga tekanan dari luar (terutama dari air laut untuk daerah bagian lambung kapal yang tercelup). Baja kapal yang digunakan untuk kapal harus mempunyai kekuatan tinggi dan sesuai dengan peraturan-peraturan Biro Klasifikasi Indonesia. Baja yang digunakan untuk bagian lambung kapal ada dua macam yaitu baja dengan kekuatan tarik  $48 \text{ kg/mm}^2 - 60 \text{ kg/mm}^2$  serta baja dengan kekuatan tarik  $50 \text{ kg/mm}^2 - 63 \text{ kg/mm}^2$  (BKI, 2006).

Pada bagian sisi lambung kapal, terdapat pelat baja yang mengalami proses pelengkungan untuk mendapatkan bentuk badan kapal sesuai dengan gambar rencana garis kapal (*body plan*). Proses pelengkungan pelat baja

tersebut dilakukan dengan dua cara yaitu proses *bending* dingin dan *bending* pemanasan garis (*bending line heating*).

*Bending* adalah proses pembentukan pelat atau profil untuk mendapatkan bentuk lengkung yang diinginkan sesuai dengan gambar *line/body plans* pada bidang perkapalan atau pelengkungan disesuaikan dengan gambar rencana garis kapal yang bersangkutan. Setiap selesai pelaksanaan *bending* biasanya lengkung yang tercipta tidak begitu sempurna, dimana lengkung pelat tidak sesuai dengan gambar rencana garis kapal sehingga pelat lambung kapal tersebut tidak dapat mengalami proses *assembling*. Hal ini terjadi karena terbatasnya fungsi alat roll *bending*, dan untuk mendapatkan ketepatan bentuk lengkung sesuai dengan gambar rencana garis kapal dilakukan proses *line heating*.

*Line heating* merupakan teknik pemanasan yang memanfaatkan nyala api *brander* untuk membuat bentuk-bentuk lengkung atau menghilangkan deformasi pada pelat baja. Teknik pemanasan dapat dilakukan dengan dua cara yaitu pemanasan garis (*line heating*) dan pemanasan setempat (*spot heating*). Di perusahaan dok dan galangan kapal PT. Jasa Marina Indah, Pelabuhan Tanjung Mas Semarang, proses pembuatan bentuk-bentuk lengkung kebanyakan dilakukan dengan menggunakan metode pemanasan garis (*line heating*). Teknik pemanasan setempat menimbulkan kerusakan disekitar titik pemanasan, dan kerusakan tersebut tidak dapat dihilangkan. Perbedaan antara pemanasan garis dan pemanasan setempat dapat dilihat pada Tabel 1.1 (Furunaka,2002).

Manfaat penggunaan teknik pemanasan garis (*line heating*) pada proses pelengkungan pelat baja (Pribadi, 1997) adalah sebagai berikut :

- Mengurangi pekerjaan yang menggunakan peralatan penekan yang berat.
- Mendapatkan hasil yang lebih akurat pada proses pembuatan bentuk lengkung pelat.
- Dapat diaplikasikan untuk pembentukan pelat-pelat dengan ukuran besar.



- Memudahkan pekerjaan perakitan konstruksi dengan menghilangkan deformasi yang terjadi pada setiap tahap pekerjaan.

**Tabel 1.1** Perbandingan antara pemanasan garis dan pemanasan setempat  
( Pribadi, 1997 )

<b>Jenis Pemanasan</b> <b>Parameter</b>	<b>Pemanasan Garis</b> <b>(Line Heating)</b>	<b>Pemanasan Setempat</b> <b>(Spot Heating)</b>
<b>Pengerutan</b>	Sedikit	Banyak
<b>Hasil Pemanasan</b>	Halus	Masih terdapat bekas-bekas
<b>Temperatur Pemanasan</b>	Relatif rendah	Tinggi
<b>Teknik</b>	Mudah	Agak sulit
<b>Pengerjaan dengan Palu</b>	Tidak ada	Perlu
<b>Kerusakan di Sekitar Daerah Terpengaruh Panas (<i>Heat Affected Zone</i>)</b>	Sedikit	Banyak

Salah satu aplikasi penggunaan proses pemanasan garis di perusahaan Dok dan Galangan Kapal PT. Jasa Marina Indah, Pelabuhan Tanjung Mas Semarang adalah pada pembuatan lambung kapal seperti yang terlihat pada gambar 1.1.

Proses pemanasan garis menghasilkan pelengkungan pada pelat baja yang disebabkan oleh pemanasan pada garis desain (garis pemanasan), diakibatkan oleh hasil perbedaan antara elongasi (penguluran, pemanjangan dan pemuaian) antara sisi yang dipanaskan dengan sisi belakangnya. Selain itu, pada saat pendinginan terdapat elongasi pada sisi belakang yang disebabkan oleh dampak pengerutan sisi yang dipanaskan. Akibat proses pemuaian (pada saat pemanasan) dan pengerutan (pada saat pendinginan) pada pelat baja, seperti halnya pada proses pengelasan, dimana akibat pemuaian dan pengerutan pada waktu pengelasan

mengakibatkan terjadinya tegangan sisa pada sambungan las (Wiryosumarto, 2000).



Gambar.1.1.Pelat lambung kapal yang telah mengalami pelengkungan dengan proses pemanasan garis (*Line Heating*).

Penelitian ini akan menganalisa pengaruh proses *line heating*/pemanasan garis pada pelat baja, dimana dapat menimbulkan perubahan kekerasan pelat baja, perubahan struktur mikro baja dan terjadinya korosi. Korosi inilah salah satu faktor penyebab terjadinya kerusakan pelat baja lambung kapal yang dapat mempengaruhi kekuatan struktur kapal secara keseluruhan.

## 1.2.Perumusan Masalah

Baja yang digunakan untuk lambung kapal harus mempunyai kekuatan yang cukup untuk menahan tekanan air ke atas. Baja yang biasa digunakan untuk lambung kapal adalah baja dengan kekuatan tarik dari  $48 \text{ kg/mm}^2 - 60 \text{ kg/mm}^2$  dan baja dengan kekuatan tarik  $50 \text{ kg/mm}^2 - 63 \text{ kg/mm}^2$  (BKI, 2006). Selain harus mempunyai kekuatan yang cukup untuk menahan tekanan air ke atas, baja yang digunakan untuk lambung kapal juga rentan terkena korosi, karena bagian lambung tercelup air laut dimana air laut bersifat korosif.

Dengan adanya proses pemanasan garis terhadap pelat baja pada konstruksi lambung kapal, menimbulkan tegangan sisa. Apabila tegangan sisa

tersebut berkombinasi dengan lingkungan yang korosif dapat menimbulkan terjadinya korosi yang dapat mempengaruhi kekuatan baja. Sehingga permasalahan yang akan diteliti adalah apakah proses pemanasan garis (*line heating*) pada baja dapat mempengaruhi kekuatan baja, ditinjau dari kekerasan dan metalografi pelat ? Berapakah temperatur optimal dari proses pemanasan garis (*line heating*) agar baja tetap memiliki kekuatan yang tinggi dan terhindar dari korosi?

### 1.3.Originalitas Penelitian

Penelitian mengenai pengaruh proses pemanasan garis (*line heating*) terhadap perubahan sifat mekanis pelat baja lambung kapal belum pernah dilakukan. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya (penelitian oleh Triwilaswandio, "*Pengaruh Proses Pembentukan Cara Panas (Flame Heating Technique) pada Kekuatan Mekanis Pelat Baja Kelas A-BKI Produksi Krakatau Steel*" 1997) adalah selain membahas pengaruh proses pemanasan garis terhadap kekerasan material pelat baja setelah proses *bending line heating* dilakukan, juga dilihat dari metalografi baja yang terbentuk pada permukaan pelat baja. Selain dua hal di atas penelitian ini ditujukan untuk menghitung laju korosi yang terjadi karena proses *bending line heating* tersebut.

### 1.4.Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dan menjadi masukan bagi Perusahaan Dok dan Galangan Kapal PT. Jasa Marina Indah Semarang, khususnya dalam proses pemanasan garis untuk pelengkungan kapal, yaitu diperolehnya temperatur pemanasan yang optimal dan media pendingin yang baik pada proses pemanasan garis (*line heating*) untuk memperoleh kualitas pelat baja yang optimal.

Sedangkan untuk instansi kampus, diharapkan dapat bermanfaat sebagai sumbangan literatur atau bahan untuk penelitian selanjutnya. Dan untuk diri sendiri diharapkan dapat menambah wawasan tentang proses pemanasan garis.

### 1.5. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini, antara lain :

- a. Menganalisa pengaruh proses pelengkungan pelat baja bagian sisi lambung kapal (*bending*) dengan bantuan pemanasan garis (*line heating*), terhadap perubahan sifat mekanis baja terutama sifat kekerasan pelat baja.
- b. Menganalisa pengaruh *bending line heating* dengan beberapa temperatur pada proses pemanasan garis (*line heating*), terhadap laju korosi dan perubahan sifat mekanis atau kekerasan pelat baja lambung kapal, sehingga dapat diperoleh temperatur optimal agar baja memiliki laju korosi minimal
- c. Menganalisa metalografi pelat baja karena proses *bending* dingin dan *bending line heating* pada pabrikasi pelat baja lambung kapal.

### 1.6. Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah dilakukan dalam penelitian ini agar dapat mencapai tujuan yang diharapkan adalah sebagai berikut :

- a. Pelat baja lambung kapal yang digunakan sebagai spesimen penelitian merupakan pelat baja standart A BKI (Biro Klasifikasi Indonesia) yang memiliki komposisi kimia dan sifat mekanis sama dengan Baja AISI E 2512.
- b. Pengujian Korosi dilakukan di Laboratorium Teknologi Tepat Guna Diploma Teknik Kimia FT-Undip, dengan uji celup menggunakan air laut yang memiliki salinitas sesuai dengan perairan Laut Jawa.
- c. Lokasi pengambilan sampel pelat baja lambung kapal, di Dok dan Galangan Kapal PT Jasa Marina Indah, Semarang.

### 1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tesis ini adalah :

- 1) Pendahuluan, menguraikan tentang: latar belakang, perumusan masalah, originalitas, manfaat, tujuan, pembatasan masalah dan sistematika penulisan laporan tesis.

- 2) Dasar teori, menguraikan tentang teori–teori yang mendukung dalam pemecahan masalah dan analisis meliputi : karakteristik pelat baja, sifat mekanis pelat baja, uji sifat mekanik baja, struktur mikro pelat baja, proses *line heating*, aplikasi pelat baja pad kapal, kondisi media air laut, laju korosi, pengaruh proses pembentukan cara panas pada kekuatan mekanis pelat baja kelas A-BKI produksi Krakatau steel, analisa peningkatan sifat tegang untuk bending pelat dengan *line heating* berdasarkan transformasi fase baja.
- 3) Metodologi penelitian, menguraikan tahap atau langkah-langkah penelitian sesuai dengan prosedur penelitian pada umumnya, penentuan bahan penelitian (spesimen), eksperimen uji celup di laboratorium yang mengarahkan peneliti pada analisis dan pemecahan masalah dengan baik.
- 4) Hasil dan pembahasan, merupakan bab pengolahan data dari hasil eksperimen di laboratorium yang diperoleh selama melakukan penelitian, untuk selanjutnya dilakukan pembahasan dan analisis.
- 5) Kesimpulan dan saran, ini merupakan tahap akhir dalam menyusun tesis, yang berisikan kesimpulan dan saran atau rekomendasi sebagai bahan pertimbangan bagi Perusahaan dalam menentukan tingkat pemanasan dan pendinginan saat *line heating* agar pelat lambung kapal terhindar dari resiko korosi.

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1. Karakteristik Pelat Baja**

Pelat baja merupakan lembaran baja paduan yang terdiri dari besi dan karbon serta unsur lainnya. Karbon merupakan salah satu unsur yang penting karena dapat mempengaruhi sifat kekerasan dan keuletan baja. Pada industri perkapalan, baja merupakan logam yang banyak digunakan baik dalam bentuk pelat, profil, pipa, balok, batang, dan sebagainya.

Baja yang digunakan pada industri perkapalan memiliki kandungan karbon antara 0,14 % s/d 0,23 %, dan terdiri dari lima tingkatan baja yaitu Grade A-E, dimana proses pabrikasi, inspeksi dan pengujian dilakukan berdasarkan kondisi tertentu dan hasil akhir di sertifikasi oleh biro klasifikasi (*classification societies*). Baja kekuatan tarik tinggi (*high tensile steel*) dibuat agar memiliki sifat mekanis yang lebih tinggi dalam: kekerasan (*toughness*), ulet (*ductility*), mudah di las (*weldability*) dan kekuatan (*strength*), dengan penambahan unsur *vanadium*, *chromium*, *nickle*, dan *niobium*.

Baja karbon merupakan baja yang mengandung unsur-unsur tertentu bertujuan untuk memperoleh sifat mekanis yang diinginkan. Biasanya ditambahkan unsur karbon yang merupakan elemen yang berpengaruh terhadap sifat mekanisnya. Unsur karbon yang terdapat pada baja rendah pada umumnya dibawah 0,10 % dan baja karbon tinggi atau baja khusus unsur karbonnya diatas 0,10 %. Baja paduan rendah mengandung unsur-unsur paduan sebagai elemen tambahan pada besi dan karbon. Unsur-unsur paduan tersebut dapat berupa : mangaan (Mn), nikel (Ni), kromium (Cr), molibden (Mo), silikon (Si) dan lain- lain.

Pelat baja karbon tergantung pada kadar karbon yang dikandungnya dapat diklasifikasikan menjadi tiga golongan yaitu (Smallman, 2000) :

1. Baja karbon rendah (*mild and low carbon steel*), ( $< 0,3 \% C$ ), atau baja ringan adalah bentuk yang paling umum dari baja karena karbonnya relatif rendah, sementara itu memberikan sifat-sifat material yang dapat diterima untuk banyak aplikasi namun tidak dapat

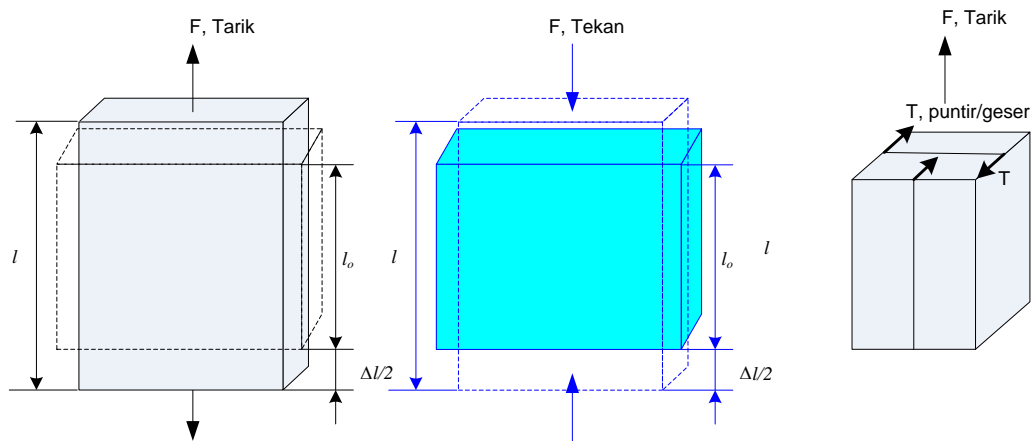
dikeraskan karena kandungan karbonnya tidak cukup untuk membentuk martensit. Baja karbon rendah (*low carbon steel*) mengandung sekitar 0,05-0,15 % karbon dan baja ringan (*mild steel*) mengandung 0,16-0,29 % karbon karena itu tidak rapuh atau ulet. Baja ringan mempunyai kekuatan tarik relatif rendah, tetapi murah dan lunak; kekerasan permukaan dapat ditingkatkan melalui *carburizing*. Penggunaannya sebagai baja struktural bahan konstruksi kapal, konstruksi kendaraan bermotor dan sebagainya.

2. Baja karbon sedang kandungan karbon 0,30-0,59 %. Memiliki sifat keuletan, kekuatan dan ketahanan aus yang baik; digunakan untuk komponen yang besar, untuk penempaan dan komponen otomotif. Ketika kandungan karbon naik, logam menjadi lebih keras dan kuat tetapi kurang ulet dan lebih sulit untuk mengelas. lebih keras dan lebih kuat dibandingkan dengan baja karbon rendah.
3. Baja karbon tinggi (0,6-0,99 %), Secara umum, kandungan karbon yang lebih tinggi menurunkan titik leleh dan suhu perlawanan (*temperature resistance*) memiliki kekerasan tinggi namun keuletannya lebih rendah, sangat kuat, yang digunakan untuk pegas dan kawat kekuatan-tinggi, perkakas potong dan sebagainya. Baja karbon tertinggi (*Ultra-high carbon steel*) memiliki kandungan karbon 1,0 – 2,0 %, dapat ditempa untuk mendapatkan kekerasan. Digunakan untuk tujuan khusus seperti pisau, as roda dan tujuan non-industri lainnya. Baja dengan kandungan karbon lebih dari 1,20 % dibuat menggunakan metalurgi bubuk (*powder metallurgy*). Baja dengan kandungan karbon di atas 2,0 % dianggap sebagai besi paduan (*cast iron*).

Kandungan karbon mempengaruhi kekuatan luluh baja karena atom karbon akan menempati kisi kristalin secara inter fusi pada *body-centered cubic/BCC*. Pengurangan mobilitas karbon interstisial (dislokasi) memiliki efek pengerasan pada besi. Agar menyebabkan dislokasi, harus menerapkan tegangan/stres pada tingkat yang cukup tinggi. Hal ini karena atom karbon interstisial menyebabkan beberapa sel kisi BCC besi mendistorsi.

### 2.1.1. Sifat Mekanis Pelat Baja

Sifat mekanis baja berkaitan dengan kekuatan, kekerasan, keuletan dan kekakuan. Sifat ini dibutuhkan karena sebuah benda memperoleh tiga beban yaitu: tarik, tekan dan geser, ilustrasinya dapat dilihat dalam Gambar.2.1. berikut.



Gambar.2.1. Beban yang bekerja pada benda (Azhari, 2006)

Untuk mengetahui besar masing-masing sifat mekanis yang dimiliki oleh baja dapat dilakukan dengan berbagai macam uji mekanis antara lain :

- a. uji tarik (*tensile test*),
- b. uji tekan (*compression test*),
- c. uji torsi (*torsion test*),
- d. uji geser (*shear test*) dan
- e. uji kekerasan (*hardness test*)

### 2.1.2. Uji Kekerasan (*hardness test*)

Uji Kekerasan adalah mengukur ketahanan material terhadap deformasi plastis yang terlokalisasi (lengkungan kecil atau goresan).

Macam- macam uji kekerasan:

- Uji kekerasan Rockwell
- Uji kekerasan Brinell
- Uji kekerasan Vicker
- Uji kekerasan Knoop

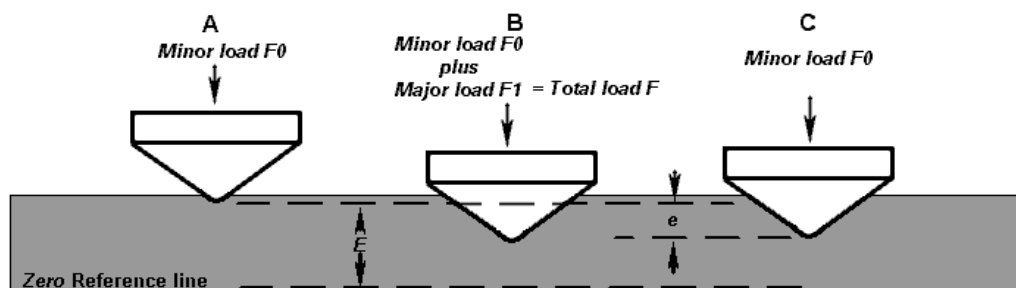


### a. Uji Kekerasan Rockwell

Uji kekerasan dalam metode rockwell benda uji ditekan dengan penetrator (bola baja dan intan, dll). Harga kekerasan di peroleh dari perbedaan kedalaman dari beban mayor dan minor. Beban minor merupakan beban awal yang diberikan untuk pengujian kekerasan *Rockwell* yang sudah ditentukan, sedangkan beban mayor merupakan beban minor ditambahkan dengan beban tambahan yang diberikan saat pengujian kekerasan. Dalam metode *Rockwell*, nilai kekerasan berdasarkan kedalaman penekanan indentor dan hasilnya dapat langsung dibaca pada jarum penunjuk indikator di mesin *Rockwell* ilustrasi pengujian kekerasan dapat dilihat pada Gambar.2.2.

Nilai Kekerasan Rockwell (HR) :

$$HR = E - e$$



Gambar.2.2. Penetrasi *Rockwell ball*. (Raymond, 1999).

$F_0$  = beban awal (*preliminary minor load in kgf*)

$F_1$  = Beban tambahan (*additional major load in kgf*)

$F$  = Beban total (*total load in kgf*)

$e$  = Penambahan kedalaman penetrasi dari beban mayor  $F_1$ , diukur dalam unit 0.002 mm

$E$  = Konstanta tergantung dari indenter: 100 unit untuk diamond indenter, 130 unit untuk steel ball indenter (contoh intender pada Tabel 2.1).

Tabel.2.1. Skala *Rockwell Hardness*

Scale	Indenter	Minor Load $F_0$ kgf	Major Load $F_1$ kgf	Total Load $F$ kgf	Value of $E$
A	Diamond cone	10	50	60	100
B	1/16" steel ball	10	90	100	130
C	Diamond cone	10	140	150	100
D	Diamond cone	10	90	100	100
E	1/8" steel ball	10	90	100	130
F	1/16" steel ball	10	50	60	130
G	1/16" steel ball	10	140	150	130
H	1/8" steel ball	10	50	60	130
K	1/8" steel ball	10	140	150	130
L	1/4" steel ball	10	50	60	130
M	1/4" steel ball	10	90	100	130
P	1/4" steel ball	10	140	150	130
R	1/2" steel ball	10	50	60	130
S	1/2" steel ball	10	90	100	130
V	1/2" steel ball	10	140	150	130

*Sumber: rockwell hardness test*

#### b. Uji Kekerasan Brinell

Indenter : - Bola baja keras ; diameter 10 mm (0,394")  
 - Tungsten carbide ; diameter 10 mm (0.394")

Beban : 500 - 3000 kg, step 500 kg

Angka kekerasan Brinell adalah fungsi beban dan diameter lobang hasil.

$$HB = \frac{2P}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]} \quad 2.1$$

P = beban (kgf)

D = diameter indenter (mm)

d = diameter lubang (mm)

#### c. Uji kekerasan Mikro Knoop dan Vickers

Pengujian vickers bertujuan untuk menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap diaman/intan berbentuk piramida yang ditekan pada permukaan material uji.

Angka kekerasan vickers (HV) adalah hasil bagi (kwosien) dari beban uji  $F$  dalam Kg dan luas permukaan bekas luka tekan intan piramid  $A$  dalam  $\text{mm}^2$

Indeter : intan piramid

Beban : 1 - 1000 gram

Hasil test berupa lekukan diperiksa dengan mikroskop

$HK = \text{hardness numberknoop (KHN)}$

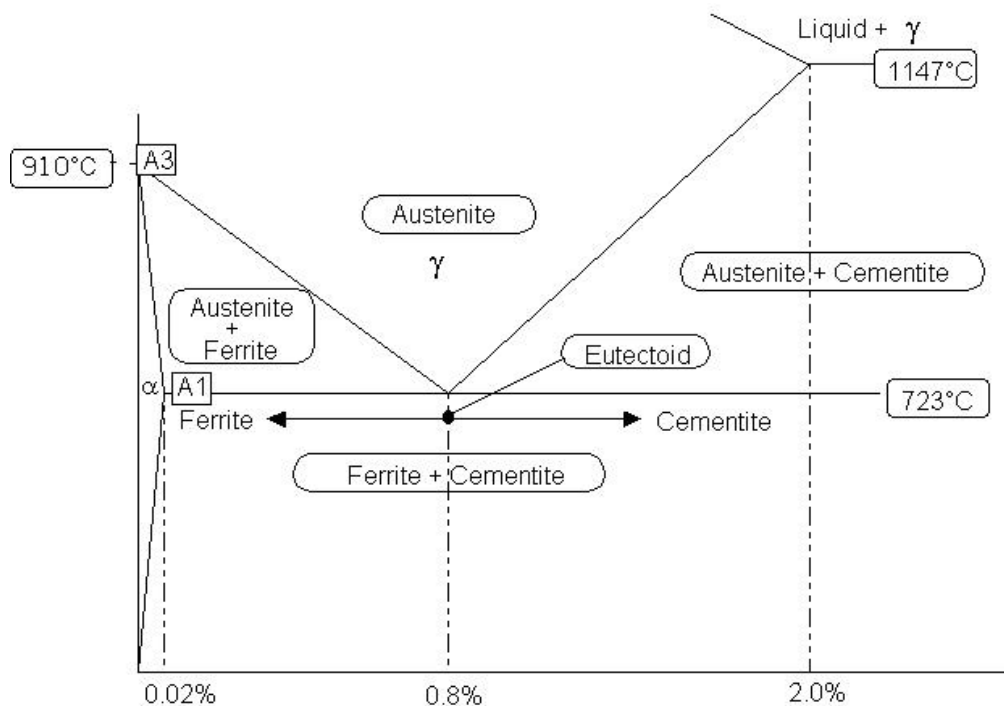
$HV = \text{hardness number vickers (VHN)}$

Knoop dan Vickers digunakan untuk uji kekerasan mikro : Daerah kecil dari spesimen da uji bahan getas (keramik).

### 2.1.3. Struktur Mikro Pelat Baja

Struktur mikro sangat berkaitan dengan sifat mekanis baja. . Terdapat perbedaan antara sifat-sifat mekanis terutama karena banyaknya karbon di dalam baja. Hal ini tidak hanya disebabkan kadar karbon melainkan cara mengadakan ikatan dengan besi yang dapat mempengaruhi sifat baja. Baja yang didinginkan secara lambat menuju suhu ruangan dibedakan menjadi tiga bentuk utama struktur mikro : *ferrite*, *cementite* dan *pearlite* (Schonmetz : 1985).

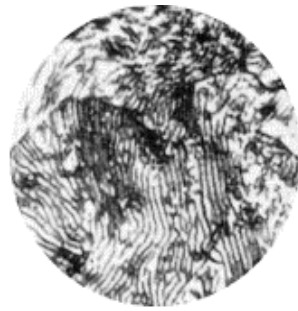
Struktur mikro pelat baja dapat di pahami melalui metalurgi baja karbon dengan diagram besi karbon (Fe-C) Gambar.2.3. menunjukan transformasi fasa yang terjadi sebagai akibat dari perlakuan panas pada pelat baja antara lain : pemanasan dan pendinginan, proses pendinginan antara lain mengurangi suhu transformasi misalnya: titik A1 akan dikurangi dari  $723^{\circ}\text{C}$  sampai  $690^{\circ}\text{C}$  akan memiliki pengaruh yang signifikan pada metalurgi pelat baja.



Gambar.2.3. Diagram fasa baja (Raymond, 1999)

Pada diagram di atas terdapat beberapa fasa dari metalurgi baja antara lain :

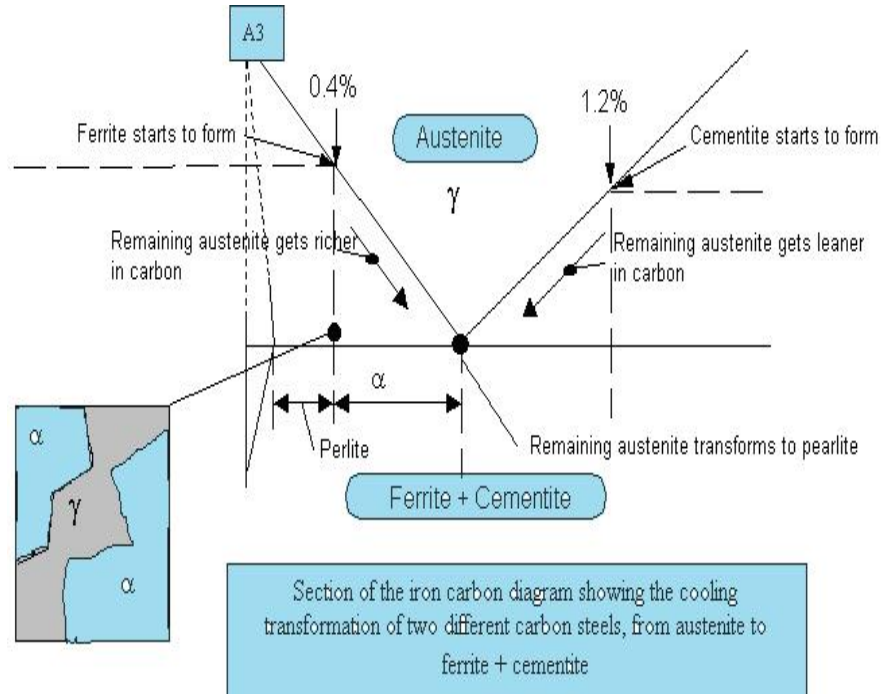
1. *Austenite* ( $\gamma$ -besi), Fase baja karbon pada suhu tinggi ( $\sim 910^\circ\text{C}$ ). Memiliki struktur atom kristal kubus pusat sisi (*FCC*) yang dapat berisi sampai dengan 2% karbon.
2. *Ferrite* ( $\alpha$ -besi,  $\delta$ -besi), Fase ini memiliki struktur badan pusat kubik (*BCC*) yang dapat menyimpan karbon sangat kecil; 0,0001% pada suhu kamar. Dapat berada sebagai salah satu dari : alfa atau delta ferrite.
3. *Cementite* (besi karbon,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ), Fase tidak seperti *ferrite* dan *austenite*, *cementite* intermetalik sangat keras merupakan gabungan dari 6,7% karbon dan sisanya besi, simbol kimianya  $\text{Fe}_3\text{C}$ . *Cementite* memiliki sifat sangat keras, tetapi bila dicampur dengan lapisan *ferrite* lunak kekerasan berkurang. Pendinginan lambat memberikan *pearlite*; lembut mudah dimesin tapi ketangguhan menurun. Pendinginan cepat memberikan lapisan *ferrite* dan *cementite* yang sangat halus; lebih keras dan lebih tangguh, dapat dilihat dalam Gambar.2.4.



Pearlite :  
 Ferrite = daerah cerah  
 Cementite = daerah gelap

Gambar.2.4. mikrostuktur fase *ferrite* dan *cementite* (Raymond, 1999).

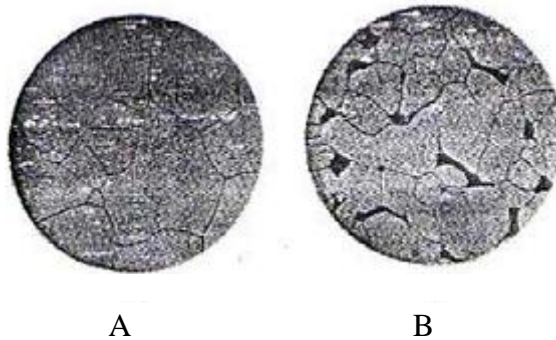
4. *Pearlite* (88% *ferrite*, 12% *cementite*), Merupakan Fase campuran *ferrite* dan *cementite* dalam satu butir. Ukuran luasan dan ketebalan mereka sangat tergantung pada laju pendinginan material; pendinginan cepat menciptakan pelat tipis yang berdekatan dan pendinginan lambat menciptakan struktur yang lebih kasar kurang memiliki ketangguhan, dapat dilihat dalam diagram fase pada Gambar.2.5. Sebuah struktur *pearlitic* sepenuhnya terdiri dari 0,8% karbon. Peningkatan karbon lebih lanjut akan menciptakan butir lapisan *cementite*, yang menyebabkan baja menjadi melemah.



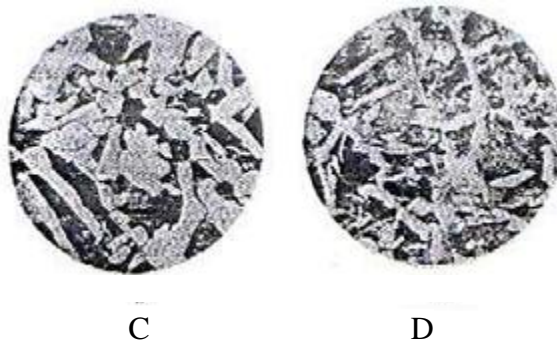
Gambar.2.5. Diagram fase baja (Raymond, 1999).

5. *Martensite*, Fase baja dari *austenite* jika didinginkan secara cepat, perubahan cepat struktur *FCC* dan *BCC* memberi cukup waktu untuk

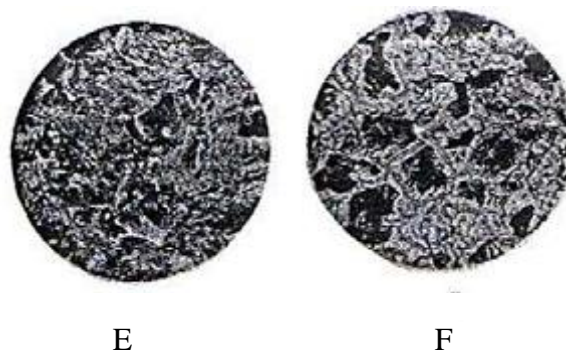
membentuk *pearlite* karbon. Hal ini menyebabkan struktur menyimpang terlihat seperti jarum halus. Tidak ada transformasi bentuk parsial yang berhubungan dengan martensite. Namun, hanya bagian yang dingin cukup cepat akan membentuk martensit. Kekerasan *martensite* tergantung pada kandungan karbon yang biasanya sangat tinggi, dan kandungan karbon sangat rendah kekerasannya berkurang. Struktur mikro dapat dilihat dalam Gambar.2.6 sampai 2.9, berikut ini.



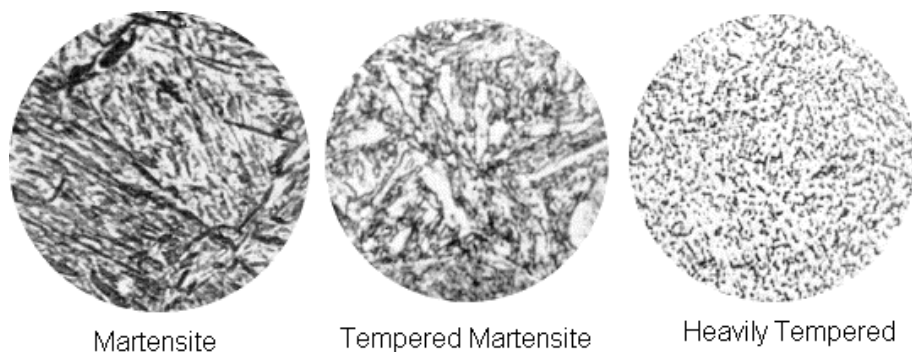
Gambar.2.6. Mikrostruktur A. Baja Murni, B. baja 0,21 % C  
(Raymond, 1999)



Gambar.2.7 Mikrostruktur C. Baja 0.40 % C, D. Baja 0,62% C  
(Raymond, 1999)



Gambar.2.8. Mikrostruktur E. Baja 0.79 % C, F.Baja 1.41 % C (Raymond, 1999)



Gambar.2.9.Mikrostruktur, *martensite*. *Tempered martensite* dan *heavily tempered*. (Raymond, 1999)

#### 2.1.4. Perlakuan Panas

Sifat mekanik baja tidak hanya tergantung pada komposisi kimia suatu paduan, tetapi juga tergantung pada strukturmikro. Suatu paduan dengan komposisi kimia yang sama dapat memiliki strukturmikro yang berbeda, dan sifat mekanik akan berbeda. Strukturmikro tergantung pada proses pengerjaan yang dialami, terutama proses laku-panas (*heat treatment*) yang diterima selama proses pengerjaan

Proses perlakuan panas adalah kombinasi dari operasi pemanasan dan pendinginan dengan kecepatan tertentu yang dilakukan terhadap logam/paduan dalam keadaan padat, sebagai suatu upaya untuk memperoleh sifat-sifat tertentu. Proses laku-panas pada dasarnya terdiri dari beberapa tahapan, dimulai dengan pemanasan sampai ke temperatur tertentu, lalu

diikuti dengan penahanan selama beberapa saat, baru kemudian dilakukan pendinginan dengan kecepatan tertentu.

Melalui perlakuan panas yang tepat, tegangan dalam dapat dihilangkan, besar butir diperbesar atau diperkecil, ketangungahan dapat ditingkatkan atau dapat dihasilkan suatu permukaan yang keras di sekeliling inti yang ulet. Perlakuan panas (*heat treatment*) ini dapat dilakukan pada :

- a. Dekat Keseimbangan (*Near-equilibrium*)
- b. Tidak Seimbang (*Non-equilibrium*)

Pada perlakuan panas dekat keseimbangan secara umum bertujuan untuk :

1. Melunakkan.
2. Menghaluskan butir.
3. Menghilangkan tegangan dalam.
4. Memperbaiki kemampuan dimesin (*machine ability*).

Jenis proses perlakuan panasnya adalah sebagai berikut :

- a. *Full annealing (annealing)*
- b. *Stress relief annealing*
- c. *Process annealing*
- d. *Spheroidizing*
- e. *Normalizing*
- f. *Homogenizing*

Sedangkan perlakuan panas yang tidak seimbang (*Non-equilibrium*), secara umum bertujuan untuk mendapatkan kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi. Jenis proses perlakuan panasnya adalah sebagai berikut :

1. *Hardening*
2. *Martempering*
3. *Austempering*
4. *Surface hardening*
  - *Carburizing*
  - *Nitriding*
  - *Cyaniding*
  - *Flame hardening*
  - *Induction hardening*



a. *Full annealing (annealing)*

*Full annealing* merupakan proses perlakuan panas untuk menghasilkan perlite yang kasar (*coarse pearlite*), tetapi lunak dengan pemanasan sampai temperatur austenitisasi dan didinginkan dengan dapur. Tujuan *Full annealing* untuk memperbaiki ukuran butir, melunakkan material sehingga keuletannya naik. Diterapkan pada baja yang mengalami deformasi plastis atau proses *machining/ forming*.

b. *Stress relief Annealing*

*Stress relief Annealing* merupakan proses perlakuan panas untuk menghilangkan tegangan sisa atau tegangan dalam akibat proses sebelumnya, terutama dilakukan untuk baja struktural dengan kandungan % C rendah. (*Low %C Structural*).

c. *Process Annealing*

*Process Annealing* merupakan proses perlakuan panas untuk melunakkan dan menaikkan kembali keuletan benda kerja agar dapat dideformasi lebih lanjut. Metode perlakuan panas terutama untuk baja paduan dengan kandungan % C rendah pemanasan selama 1 jam pada suhu 600-650°C (*no austenizing*). Pendinginan dapat terjadi pengkristalan kembali (*Recrystallizes cold worked*) ferrite, akan menurunkan tegangan secara drastis.

d. *Spheroidizing*

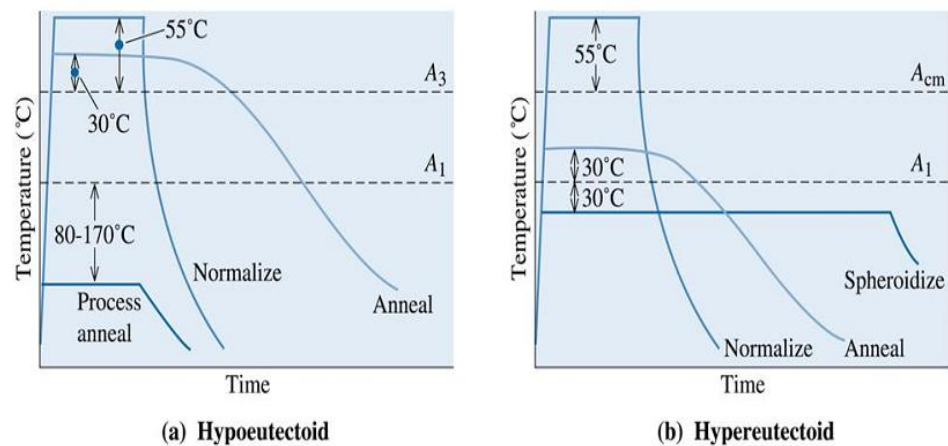
*Spheroidizing* merupakan proses perlakuan panas untuk menghasilkan struktur carbida berbentuk bulat (*spheroid*) pada matriks ferrite hal ini akan memperbaiki kemampuan di *machining* terutama untuk baja paduan dengan persentase kandungan C yang tinggi. Metode perlakuan panas pada *Spheroidizing* yang digunakan adalah:

- pemanasan dengan suhu dibawah garis A1, kemudian didinginkan
- Pemanasan dan pendinginan diantara suhu pada garis A1
- Pemanasan diatas suhu pada garis A1

### e. Normalizing

*Normalizing* merupakan proses perlakuan panas yang menghasilkan perlit halus, pendinginan dengan udara, sifatnya akan lebih keras dan kuat dibandingkan hasil *anneal*.

Temperatur kerja pada proses perlakuan panas *full annealing*, *normalizing*, *process anneal* dan *spheroidize* dapat dilihat pada Gambar.2.10



Gambar.2.10, Temperatur proses perlakuan panas pada *full annealing*, *normalizing*, *process anneal* dan *spheroidize*. (2003 Brooks/Cole).

### f. Pengerasan (*Hardening*)

Pengerasan (*Hardening*) Proses perlakuan panas untuk meningkatkan kekerasan, ketahanan aus atau ketangguhan dengan kombinasi kekerasan. Sifat kekerasan baja sangat tergantung dari :

- Temperatur pemanasan (*Austenitizing Temperature*)
- Lama pada temperatur tersebut (*Holding Time*)
- Laju pendinginan (*Cooling Rate*)
- Komposisi kimia (% C dan *Alloying*)
- Kondisi Permukaan (*Surface Condition*)
- Ukuran dan berat benda kerja (*Size and Mass*)

Kekerasan maksimum didapatkan dari pembentukan fase *martensite* atau atau fase karbida pada struktur mikro baja.

#### g. *Austenitizing Temperature*

Proses pengerasan dengan metode pemanasan pada temperatur austenitisasi. Homogeneity austenitenya, dilakukan dengan memberikan *holding time* pada temperature austenitisasi, yaitu:

- 25-50 °C diatas temperatur A3 untuk baja *hypoeutectoid*
- 25-50 °C diatas temperatur A1 untuk baja *hypereutectoid*

Setelah di lakukan pemanasan degan mempertahankan panas pada temperatue austenit, lalu dilakukan pendiginan dengan media :

- Brine (air + 10 % garam dapur)
- Air
- Salt bath
- Larutan minyak dalam air
- Udara

Proses ini sangat tergantung pada : komposisi kimia baja,• kondisi permukaan, ukuran dan berat benda kerja. Kekerasan baja sangat ditentukan oleh

jumlah relatif martensite didalam struktur mikro dan juga ditentukan oleh kekerasan martensite, dalam hal ini, sangat ditentukan oleh kemampuan baja untuk dikeraskan dengan membentuk martensite.

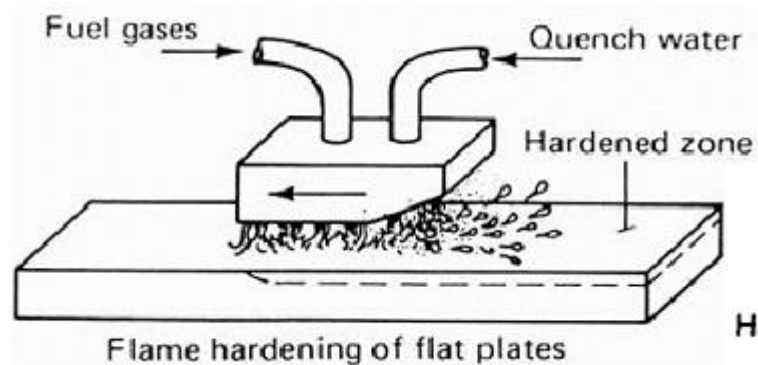
#### h. *Surface hardening*

*Surface hardening* merupakan proses perlakuan panas dengan cara baja di panaskan diatas suhu A1 dalam lingkungan yang mengandung karbon baik cair, padat atau pun gas. Dalam proses ini karbon diabsorpsi ke dalam logam memebentuk larutan padat dengan besi dan lapisan luar memiliki karbon kadar tinggi. Bila kegiatan ini dilakukan lebih lama maka karbon akan berdifusi ke bagian-bagian sebelah dalam. Biasanya tebal lapisan permukaan pengerasan adalah 0.1mm - 5mm. proses pengerasan permukaan ini bertujuan untuk :

- Untuk meningkatkan ketahanan aus
- Untuk meningkatkan ketahanan pada tegangan tinggi

- Untuk meningkatkan ketangguhan patah
- Untuk meningkatkan ketahanan lelah

Untuk tujuan diatas dapat dilakukan dengan beberapa methode yaitu : karburasi (*carburizing*), sianida (*cyaniding*), karbon sianida (*carbonitriding*) dan nitrida (*nitriding*). Proses pemanasan dapat dilakukan dengan : induksi, busur nyala api (*flame*), laser, dan pencahayaan. Contoh pemanasan nya dapat dilihat dalam gambar berikut :



Gambar.2.11. Proses pengerasan permukaan (*hardening*) dengan *flame*

#### 2.1.5.Komposisi Paduan Besi-Karbon

Komposisi kimia fasa yang terdapat dalam kondisi seimbang setelah seluruh reaksi perlakuan pada material berakhir, merupakan data yang sangat berguna dalam pengemabnagn material, pemilihan dan pemakaiannya pada produk dan diagram fasa dapat menjelaskan karakteristih bahan tersebut.

Besi murni strukturnya dapat berubah dua kali sebelum mencair, pada suhu  $912^{\circ}\text{C}$  struktur besi berubah dari kpr (kubik pemusatan ruang) ke kps (kubik pemusatan sisi). Perubahan ini berbalik pada suhu  $1394^{\circ}\text{C}$  ke struktur kpr lagi dan tetap sbail sampai mencair pada suhu  $1538^{\circ}\text{C}$ .

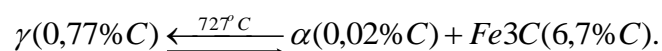
*Ferrite* (besi)-  $\alpha$ , modifikasi struktur dari besi murni pada suhu ruang disebut besi -  $\alpha$  atau *ferrite* . Ferrit lunak dan ulet, dalam keadaan murni kekuatan tariknya kurang 310 MPa. Bersifat feromagnetik pada suhu

dibawah 770°C, berat jenis *ferrite* 7,88 Mg/m<sup>3</sup> (=7,88 m/cm<sup>3</sup>). Struktur *ferrite* adalah kubik pemusatan ruang.

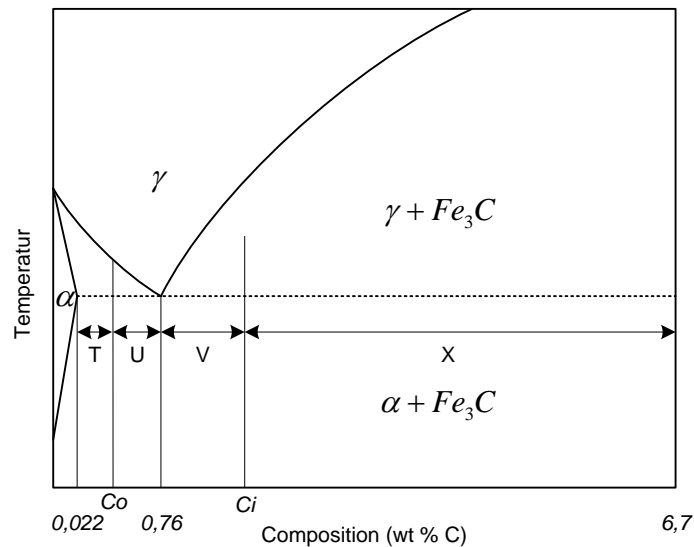
*Austenite* (besi)-  $\gamma$ , modifikasi besi dengan struktur pemusatan sisi disebut *austenite* (besi- $\gamma$ ), bentuk besi murni ini stabil pada suhu 912°C dan 1394°C, dan pada suhu stabil austenit lunak dan ulet sehingga mudah dibentuk

Besi-  $\delta$ , sama dengan besi -  $\alpha$  perbedaannya pada daerah suhu, oleh karena itu biasanya disebut *ferrite*-  $\delta$ . Daya larut karbon dalam *ferrite* -  $\delta$  kecil, akan lebih besar dari pada *ferrite* -  $\alpha$ , karena suhu yang lebih tinggi. Daya larut karbon sedikit dalam *ferrite* (  $\alpha$ , 20°C). Daya larut karbon meningkat sampai 0,02% (berat) pada suhu 727°C. Daya larut karbon dalam austenit ( $\gamma$ ) naik 0,77% (berat) pada 727°C sampai 2,11% (berat) pada suhu 1148°C.

Karbida besi (Fe<sub>3</sub>C). Pada paduan besi-karbon, karbon, melebihi batas daya larut membentuk fasa kedua, yang disebut karbida besi (*cementite*). Fe<sub>3</sub>C mempunyai sel satuan ortorombik dengan 12 atom besi dari 4 atom karbon per sel, jadi kandungan karbon : 6,7% (berat), berat jenisnya 7,6 Mg/m<sup>3</sup> (= 7,6 g/cm<sup>3</sup>). Analogi reaksi eutektik pada besi karbon dikenal dengan eutektoid, dimana reaksi eutektoid (suhu 727°C) untuk paduan Fe-C adalah (Lawrence H Van Vlack):



Komposisi eutektoid dapat dilihat dalam diagram fase, berikut ini.



Gambar.2.12. Komposisi Fe-C pada diagram fasa.

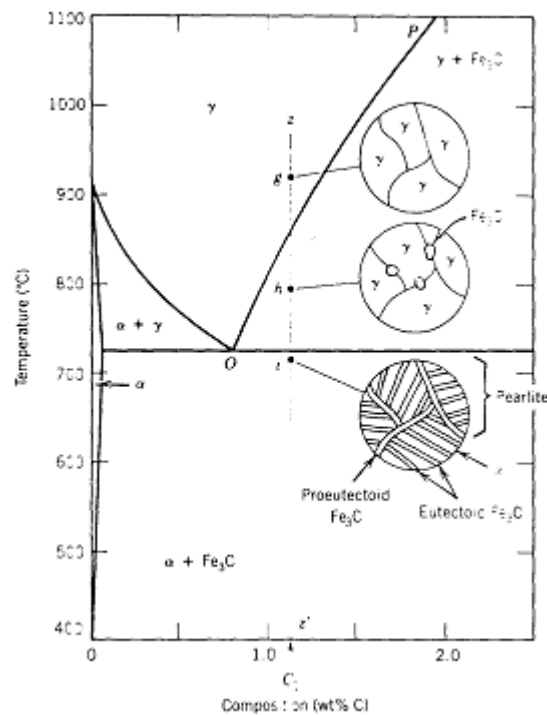
Selama proses pendinginan terjadi reaksi eutektoid Fe-C yang menyangkut pembentukan *ferrite* dan karbida ( $\hat{C}$ ), sebagai hasil dekomposisi *austenite*  $\gamma$  berkomposisi eutektoid :  $\gamma$  ( $\sim 0,8\%$  C)  $\rightarrow \alpha + \hat{C}$  , dalam campuran yang dihasilkan 12% karbida dan lebih 88% *ferrite*. Karbida dan *ferrite* terbentuk bersamaan, keduanya tercampur dengan baik (bentuk seperti lamel), terdiri dari lapisan *ferrite* dan karbida.

Mikrostruktur yang dihasilkan disebut *Pearlite*, ( diperoleh dari proses perlakuan panas). *Pearlite* terjadi dari austenit yang mempunyai komposisi eutektoid, sehingga jumlah dan komposisi *pearlite* sama dengan jumlah dan komposisi *austenite* eutektoid. Misalkan untuk menentukan jumlah *pearlite* dalam paduan 99,5% Fe-0,5% C, yang didinginkan secara perlahan dari 870° C dalam 100 gram paduan adalah : dari suhu 870° C sampai 780° C 100 gram *austenite* mengandung 0,5% C. dari 780° C sampai 727° C (+) *ferrite* memisahkan diri dari *austenite* dan kandungan karbon *austenite* naik  $\sim 0,8\%$  C. Sehingga pada

727 °C (+) : Komposisi *ferrite* = 0,02% C, jumlah *ferrite* = 38 gram.

Komposisi *austenite* = 0,8% C, jumlah *austenit* = 62 gram.

727 °C (-) : jumlah *pearlite* = 62 gram.



Gambar.2.13. Diagram mikrostruktur komposisi karbon.

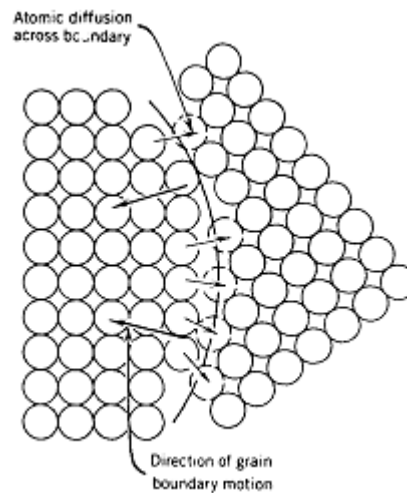
Dalam menentukan komposisi perlit dan *ferrite* ( $\alpha$ ) dapat menggunakan persamaan berikut ( Callister, 1994):

$$\text{Pearlite : } W_p = \frac{T}{T+U} = \frac{Co - 0,022}{0,76 - 0,022} = \frac{Co - 0,022}{0,738}$$

$$\text{Ferrite : } W_F = \frac{U}{T+U} = \frac{0,76 - Co}{0,76 - 0,022} = \frac{0,76 - Co}{0,738}$$

### 2.1.6 Pertumbuhan butir

Pertumbuhan butir terjadi karena perpindahan batas butir, tidak semua butir dapat tumbuh, tetapi sebagian terjadi karena adanya pengerutan. Pertumbuhan butir terjadi sejalan dengan waktu dan sebagian termasuk dalam batas ukuran butir. Pergerakan batas lapisan butir hanya terdapat jika terjadi difusi atom dari lapisan satu ke yang lainnya. Arah pergerakan atom dan lapisan butir dapat dilihat dalam gambar berikut.



Gambar.2.14 Pergerakan butir (Callister,1997)

Diameter butir ( $d_o$ ) pada proses kristalisasi material, pada waktu ( $t$ ), dapat didekati dengan persamaan sebagai berikut (Callister,1997):

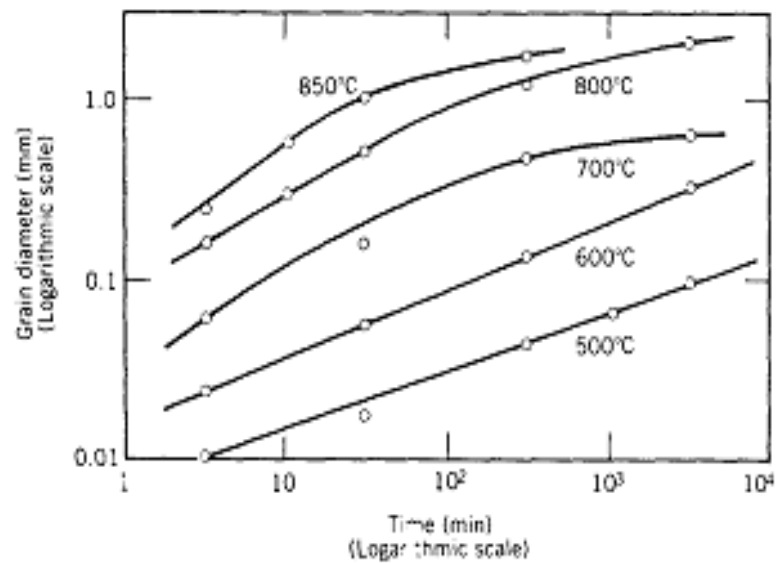
$$d^n - d_o^n = kt$$

Dimana :

$d_o$  = inisial diameter butir pada waktu,  $t = 0$ .

$K, n$  = konstanta waktu bebas,  $n$  biasanya lebih dari 2.

Hubungan pertumbuhan butir berdasarkan waktu pemanasan dapat dilihat dalam gambar berikut.

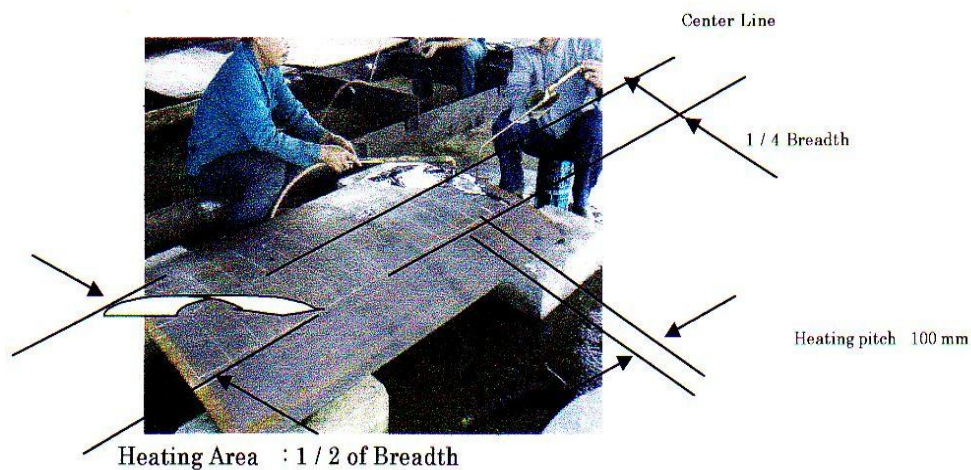


Gambar.2.15. Pertumbuhan butir versus waktu (Callister, 1997).



## 2.2 Proses *Line Heating*

Proses pemanasan garis (*line heating*) merupakan suatu metode yang dilakukan untuk memperbaiki sifat keuletan dan ketangguhan suatu pelat setelah ditekuk dingin, seperti terlihat pada gambar.2.16. Perbaikan sifat mekanis yang disebabkan oleh pemanasan pada garis desain diakibatkan oleh perbedaan antara elongasi (penguluran, pemanjangan, dan pemuaian) antara sisi yang dipanaskan dengan sisi yang belakangnya. Selain itu pada saat pendinginan, terdapat elongasi pada sisi belakang yang disebabkan oleh dampak pengerutan sisi yang dipanaskan. Proses pemanasan garis dilakukan pada temperatur sekitar 600 °C (Furunaka, 2002).



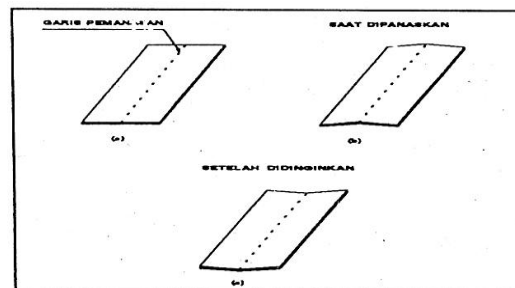
Gambar 2.16. Proses pemanasan garis pelat baja (Triwilaswandio, 1997)

Pada gambar 2.16 di atas terlihat operator yang sedang melakukan proses pemanasan garis. Proses pemanasan dilakukan sesuai garis pemanasan yang telah dibuat, dimana pada gambar 2.16 di atas terlihat bahwa jarak antara garis pemanasan (*Heating Pitch*) adalah 100 mm dan daerah yang mengalami pemanasan adalah setengah lebar pelat baja (*1/2 of Breadth*). Proses pemanasan dilakukan dengan diikuti proses pendinginan. Proses pemanasan dilakukan dengan memanfaatkan brander pemanas dan *oxyacetylene*.

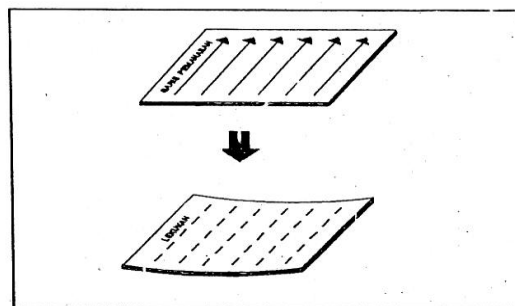
Pada beberapa kasus, *oxyacetylene* digunakan untuk memanaskan suatu pelat hingga mencapai panas yang diinginkan. Kemudian area yang dipanaskan tersebut didinginkan untuk mengontrol jumlah *shrinkage*. Laju

pendinginan dapat ditingkatkan dengan menyemprotkan air ke area yang dipanaskan (Pattee, 1962)

Sebuah pelat baja dipanaskan sepanjang garis lurus dengan brander pemanas maka akan terjadi lekukan kecil sepanjang garis tersebut. Bentuk-bentuk lengkung yang diperoleh dengan cara pemanasan garis sama halnya apabila pelat dilengkungkan dengan cara ditekan atau dirol, kecuali akan terjadi proses penyusutan akibat proses pemanasan dan pendinginan. Gambar 2.17 menunjukkan terjadinya bentuk lengkung pada suatu pelat baja yang dipanaskan dengan cara pemanasan garis. Proses terjadinya bentuk lengkung yang didapat dengan cara pemanasan garis diperlihatkan pada Gambar 2.17 dan 2.18 (Chirillo, 1982).



Gambar 2.17. Proses Pembuatan Bentuk Lengkung (Triwilaswandio, 1997)



Gambar 2.18. Proses Terjadinya Bentuk Lengkung (Triwilaswandio, 1997)

Dalam proses pembentukan pelat dengan pemanasan garis, besarnya kelengkungan yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh : tebal pelat, material pelat, besarnya tegangan awal yang diberikan secara mekanis sebelum dilakukan pemanasan (Chirillo, 1982).

Faktor-faktor yang mempengaruhi laju pemanasan dan pendinginan juga merupakan faktor utama bagi besarnya lengkungan yang terjadi (Chirillo, 1982). Faktor-faktor ini antara lain :

- Tipe dan diameter ujung brander
- Jarak antara ujung brander dengan pelat
- Kecepatan jalannya brander
- Metode pendinginan dengan air atau udara.
- Laju pendinginan.
- Jarak antar pusat pemanasan dengan pusat pendinginan.

Banyaknya faktor-faktor yang mempengaruhi hasil *line heating* tersebut menjadikan proses ini cukup sulit dilakukan oleh pekerja untuk mendapatkan hasil yang benar-benar presisi. Oleh karena itu pada negara-negara maju telah dikembangkan pengerjaan *line heating* dengan otomatisasi, yang bertujuan untuk mengurangi kesalahan yang terjadi selama proses pengerjaan serta mendapatkan hasil dengan tingkat akurasi yang tinggi (Jang, 2007).

Proses pemanasan garis, apabila dilakukan pada temperatur di atas temperatur rekristalisasi dapat menyebabkan terjadinya proses rekristalisasi, sehingga dapat mengakibatkan terjadinya perubahan sifat mekanis pada pelat baja. Proses rekristalisasi pada logam murni terjadi lebih cepat dibandingkan paduan. Untuk logam murni, temperatur rekristalisasi umumnya adalah  $0.3T_m$  dimana  $T_m$  merupakan temperatur lebur. Untuk beberapa paduan temperatur rekristalisasi adalah  $0.7T_m$ . Temperatur rekristalisasi dan temperatur lebur untuk beberapa logam dan paduan dapat dilihat pada pada Tabel.2.2.di bawah ini (Callister, 1994).

**Tabel 2.2.** Temperatur rekristalisasi dan temperatur lebur beberapa logam dan paduan (Callister, 1994)

Logam	Temperatur rekristalisasi		Temperatur Lebur	
	°C	°F	°C	°F
Lead	-4	25	327	620
Tin	-4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminum (99.999 wt%)	80	176	660	1220
Copper (99.999 wt%)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu – 40 Zn)	475	887	900	1652
Nikel (99.999 wt%)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

Media pendingin yang umumnya digunakan pada proses perlakuan panas (Callister, 1994), adalah :

- a. Air
- b. Oli
- c. Udara

Pendinginan dengan oli sangat cocok untuk perlakuan panas terhadap beberapa paduan baja. Pendinginan dengan menggunakan air, dapat menyebabkan timbulnya retak dan pelengkungan. Sedangkan pendinginan dengan udara kebanyakan dapat menghasilkan struktur *pearlite* (Callister, 1994). Proses pendinginan pada pemanasan garis umumnya dengan menggunakan air, karena tujuan dari proses pemanasan garis adalah untuk menghasilkan pelengkungan. Sedangkan pendinginan dengan media oli tidak digunakan karena faktor biaya yang akan dikeluarkan cukup tinggi.

### 2.3. Aplikasi Pelat Baja pada Kapal

Pelat baja pada kapal diaplikasikan untuk seluruh bangunan kapal dengan komposisi standart konstruksi kapal yang dikeluarkan oleh biro klasifikasi kapal (*Standards: ABS, BKI, DNV, RINA, GL, LR, BV, , NK, KR, CCS and etc*) dengan klas baja : A, B, C, D dan E. ( *Grade: A, B, D, E, AH32-AH40, DH32-DH40 ,A32 ,A36 ,D32, D36 and etc*) dengan tebal: 8 mm s/d 100 mm, lebar : 1500 mm s/d 2700 mm, panjang : 6 m s/d 13 m.

Sifat mekanis yang harus dimiliki untuk baja kapal biasa adalah : batas lumer  $24 \text{ kg/mm}^2$ , kekuatan tarik  $41 \text{ kg/mm}^2$  s/d  $50 \text{ kg/mm}^2$ , dan regangan patah minimal 22%. Baja kapal tegangan tinggi (untuk lambung kapal) memiliki sifat mekanis : tegangan lumer minimal  $32 \text{ kg/mm}^2$  dan kekuatan tarik  $48 \text{ kg/mm}^2$  s/d  $60 \text{ kg/mm}^2$  untuk tegangan lumer minimum  $36 \text{ kg/mm}^2$ , kekuatan tariknya  $50 \text{ kg/mm}^2$  s/d  $63 \text{ kg/mm}^2$ , selain itu juga digunakan baja tempa yang memiliki kekuatan tarik minimal  $41 \text{ kg/mm}^2$ .

Pemakaian pelat baja untuk bangunan kapal memiliki resiko kerusakan tinggi terutama terjadi korosi pada pelat baja yang merupakan proses elektrokimia, akibat lingkungan air laut yang memiliki resistifitas sangat rendah (  $\pm 25 \text{ ohm-cm}$  dibanding kan air tawar  $\pm 4.000 \text{ ohm-cm}$ ) dan sesuai

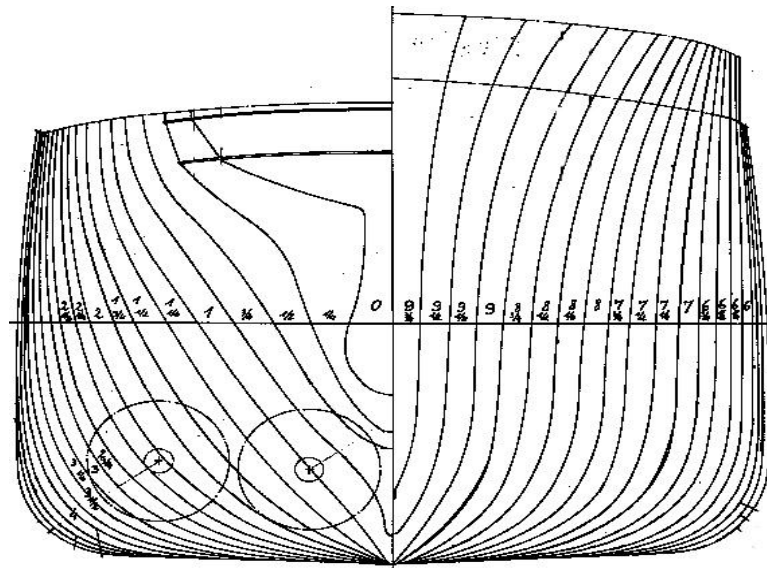
dengan posisi pelat pada lambung kapal, contoh pelat lengkung bagian buritan, pada Gambar 2.19. Posisi pelat baja lambung kapal terbagi dalam tiga bagian yaitu :

- a. Selalu tercelup air (pelat lajur alas, pelat lajur bilge, dan pelat lajur sisi sampai sarat minimal).
- b. Keluar masuk air (pelat lajur sisi kapal dari syarat minimal sampai sarat maksimal).
- c. Tidak tercelup air (pelat lajur sisi mulai dari sarat maksimal sampai main deck).



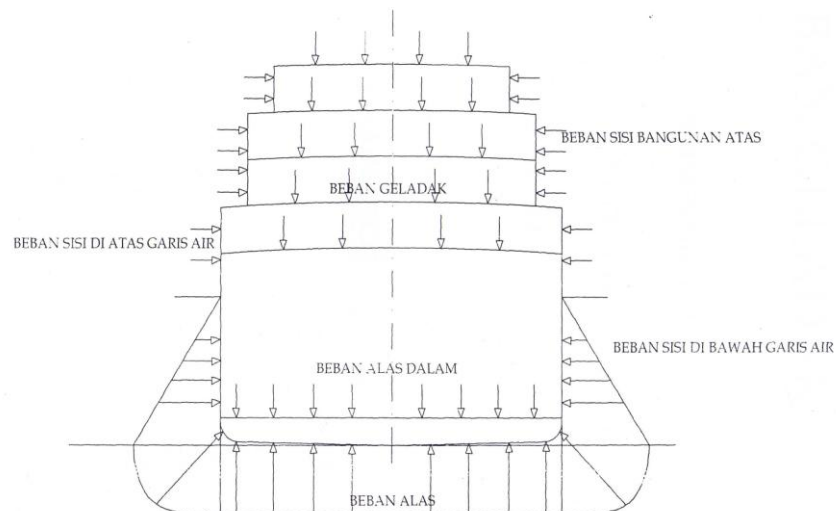
Gambar. 2.19. Pelat baja lambung kapal.

Bagian badan kapal yang memiliki lekungan pelat yang signifikan adalah pada lajur bilga dari haluan sampai buritan kapal, mengikuti bentuk badan kapal pada rencana garis. Hal ini bertujuan untuk memberikan efek tahanan kapal seminimal mungkin, sehingga daya mesin induk yang digunakan pada kapal dapat lebih efisien. Bentuk lengkung pelat lambung kapal dalam Gambar.2.20.



Gambar.2.20. Body plan kapal (rencana garis) (Tupper,2002).

Pelat baja lambung kapal selain menerima beban dari luar (air laut) juga mendapat tekanan dari dalam, dengan distribusi pembebanan pada Gambar.2.21. sebagai berikut



Gambar 2.21. Diagram benda bebas beban pada kapal (Tupper,2002).

## 2.4. Kondisi Media Air Laut

Berdasarkan segi konstruksi pada kapal laut, pelat lambung kapal adalah daerah yang pertama kali terkena air laut, dimana air laut merupakan elektrolit yang korosif (Anggono, 1999). Pada umumnya air laut dianggap sebagai lingkungan yang korosif bagi logam, terutama untuk besi dan baja.

Anggapan ini didasarkan pada teori, bahwa resistivitas air laut cukup rendah, resistivitas air laut di Indonesia sekitar 19 Ohm/cm dan resistivitas dasar laut 150 Ohm/cm, jika dibandingkan resistifitas air tawar (sekitar 4.000 Ohm/cm).

Untuk kriteria air laut dari beberapa wilayah perairan dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan Unsur pokok yang terdapat dalam media air laut pada Tabel.2.4.

Tabel 2.3. Kriteria air laut untuk beberapa wilayah perairan (Anggono, 1999)

Wilayah	Resistivitas Air (Ohm-cm)	Suhu Air (°C)	Faktor Turbulensi/Arus Air	Rapat Arus Desain mA/m <sup>2</sup>
<b>Teluk Mexico</b>	20	22	Sedang/Sedang	54-65
<b>Pantai Barat A.S</b>	24	15	Sedang/Sedang	76-106
<b>Cook Inlet</b>	50	2	Rendah/Tinggi	380-430
<b>Laut Utara</b>	26-33	0-12	Tinggi/Rendah	86-216
<b>Teluk Persi</b>	15	30	Sedang/Rendah	54-86
<b>Indonesia</b>	19	24	Sedang/Sedang	54-65

Mekanisme korosi dalam air laut tidak berbeda dengan mekanisme korosi lingkungan basah lainnya, yaitu mekanisme elektrokimia. Hal ini mengandung konsekuensi terjadinya serangan korosi terhadap pelat lambung kapal. Korosi pada pelat lambung kapal dapat mengakibatkan penipisan permukaan pelat sehingga menurunkan kekuatan dan umur pakai. Korosi dapat menimbulkan beberapa kerugian diantaranya : kerugian ekonomi, sumber daya alam dan bahkan dapat membahayakan bagi manusia (Trethewey, 1991).

Tabel.2.4.Unsur pokok yang terdapat dalam media air laut  
(khlorda = 19 bagian per 1000) (Benyamin D, 2006)

Anion	Part/Million	Equevalents per Million	Part per Million per unit Chlorinity
Chloride, Cl <sup>-</sup>	18.980,00	535,30	998,90
Sulfate, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.649,00	55,10	139,40
Bicarbonete, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	139,70	2,30	7,35
Bromine, Br <sup>-</sup>	64,60	0,80	3,40
Fluoride, F <sup>-</sup>	1,30	0,10	0,07
Boric Acid, H3BO3	26,00	-	1,37
Total		593,60	

Cation	Part/Million	Equevalents per Million	Part per Million per unit Chlorinity
Sodium, Na <sup>+</sup>	10.556,10	159,00	555,60
Magnesium, MG <sup>2+</sup>	1.272,00	104,60	66,95
Calcium, Ca <sup>2+</sup>	400,10	20,00	21,06
Potassium, K <sup>+</sup>	380,00	9,70	20,00
Strotium, Sr <sup>2+</sup>	13,30	0,30	0,70
Total		593,60	

Air laut merupakan lingkungan yang korosif untuk besi dan baja terutama karena resistifitas air laut sangat rendah ( $\pm 25 \Omega\text{-cm}$ ) dibandingkan resistifitas air tawar ( $\pm 4000 \Omega\text{-cm}$ ). Proses korosi air laut merupakan proses elektro kimia. Faktor –faktor yang mendorong korosi pelat baja dalam media air laut adalah :

1. Sifat air laut (kimia-fisika dan biologis)
2. Sifat logam (pengaruh susunan kimia dan *mil scale* )

a. Sifat kimia – fisika air laut

Kandungan garam yang terlarut dalam air laut (kadar garam % dan temperatur) sangat menentukan penghantaran listrik pada air laut, yang merupakan salah satu faktor mempercepat terjadinya proses korosi. Pada kadar garam yang sama, kenaikan temperatur air laut menyebabkan daya hantar listrik air laut meningkat, sedangkan pada temperatur air laut yang sama dengan kadar garam yang meningkat menyebabkan hantaran listrik air laut naik.

b. Sifat biologis air laut

Pengaruh *fouling* (pengotoran badan kapal akibat melekatnya hewan dan tumbuhan laut) akan menimbulkan korosi pada pelat badan kapal. Proses korosi terjadi saat melekatnya mikro organisme ber sel satu pada badan kapal dengan bantuan cat sebagai zat perekatnya, sehingga terdapat lapisan yang mudah mengelupas. Pada lapisan yang meneglupas akan timbul benih-benih hewan laut dan spora-spora yang akan terus berkembang biak.

Mikro organisme yang menempel di badan kapal menimbulkan pertukaran zat yang menghasilkan zat-zat agresif seperti : NH<sub>4</sub>OH, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S dan atom-atom yang agresif, selanjutnya akibat reaksi elektro kimia terbentuklah gas oksigen. Gas oksigen dengan proses chlorophile akan



membentuk sulfit dan sulfat yang menghasilkan zat yang berpengaruh terhadap terjadinya korosi air laut.

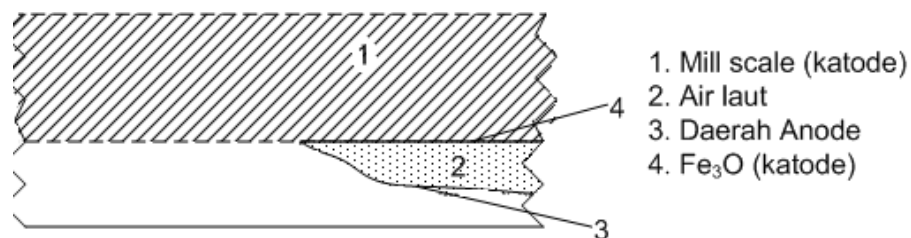
c. Susunan kimia logam.

Selain unsur Fe pada pelat baja kapal juga terdapat unsur lainnya seperti C, Si, Mn, Cu, Cr, Ni, S dan P, unsur yang menimbulkan korosi air laut adalah unsur : C, Mn, S dan P.

d. *Mill scale*

*Mill scale* terdiri dari tiga lapisan, Lapisan terluar adalah  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , lapisan tengah  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan  $\text{FeO}$ , sedangkan lapisan yang dekat pelat kapal adalah  $\text{FeO}$  dan Fe. Perbedaan potensial elektro-kimia antara pelat baja kapal  $\pm 0,28$  volt. Perbedaan potensial elektro-kimia tersebut menyebabkan terjadi reaksi yang menimbulkan korosi air laut pada pelat baja kapal.

Lapisan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dari hasil korosi air laut pada pelat baja kapal, Gambar.2.22, akan menimbulkan daerah anoda yang akan terus meluas sampai dibawah lapisan *mill scale*. Daerah anoda kedua ini, menimbulkan korosi air laut yang lebih besar dibandingkan dengan daerah anoda pertama, karena terdapat oksigen bebas dapat dengan bebas bereaksi.



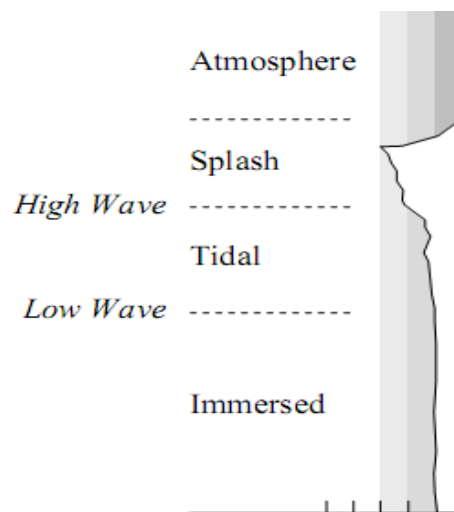
Gambar.2.22. Terjadi korosi dibawah *mill scale*.(Benyamin D, 2006)

#### 2.4.1. Zona Korosi Air Laut

Laju korosi dalam lingkungan laut (*marine*) tergantung pada posisi pelat baja kapal yang digunakan, di zona : atas permukaan air , tengelam dalam air atau antara (*tidal zone*). Konsentrasi klorida air laut tergantung pada kedekatan dan ketinggian dari permukaan laut. Korosi berkurang pada daerah yang lebih tinggi dari permukaan laut karena kurangnya percikan garam

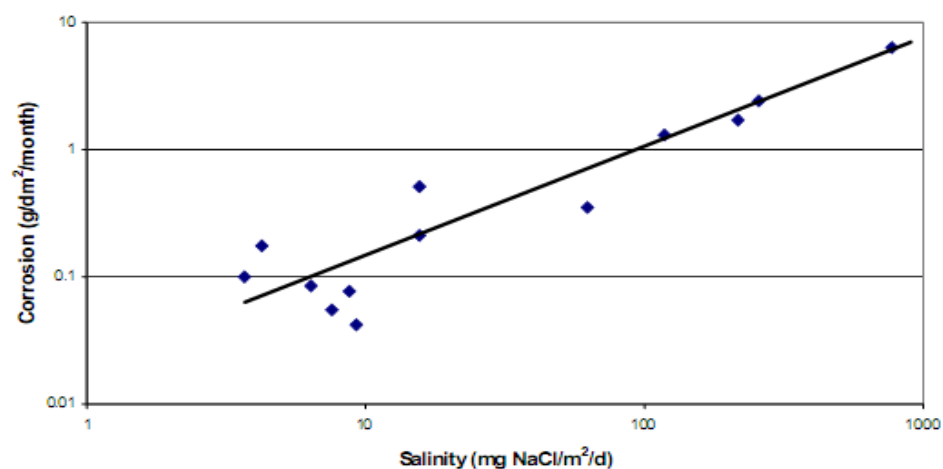
yang berkerja sebagai elektrolit dan juga karena temperatur lebih tinggi dan kelembapan lebih rendah.

Kemudian gelombang yang pecah pada permukaan pelat baja badan kapal juga memberi kontribusi terhadap laju korosi pelat tersebut, terutama terjadi pada daerah terdekat dengan permukaan air (*splash zone*) dan zona ini juga terjadi erosi, sehingga memperparah kerusakan pelat. Laju korosi masing-masing zona pelat yang berada dilingkungan air laut dapat dilihat dalam Gambar.2.23. berikut ini.



Gambar.2.23. Laju korosi berdasarkan zona korosi (Benyamin D, 2006)

Laju korosi di atas juga terpengaruh oleh salinitas atmosfir (kadar garam di udara tergantung pada letak geografis). Laju korosi karena salinitas dapat dilihat dalam Gambar.2.24 berikut.



Gambar.2.24. Laju korosi sebagai pengaruh salinitas udara (Benyamin D, 2006)

### 2.4.2. Salinitas Air Laut

Korosi akibat media air laut juga dipengaruhi oleh tingkat penggaraman atau salinitas air laut. Salinitas didefinisikan sebagai berat keseluruhan dalam gram kadar garam-garam non organik pada 1 kg air laut (jika unsur-unsur klorida dan semua unsur karbonat digantikan dengan unsur-unsur oksida dalam jumlah sesuai).

Salinitas air laut dapat dilihat dalam Tabel 2.5. dinyatakan dengan satuan per seribu (‰), salinitas air laut ini bervariasi antara : 33,00 ‰ sampai dengan 37,00 ‰. Konsentrasi garam terlarut atau ion/molekul dalam air laut dapat dilihat pada tabel berikut .

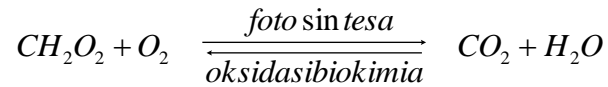
Tabel.2.5. Konsentrasi Ion/Molekul pada air laut  
(density 1,023 g/cm<sup>3</sup> pada 25°C )( Anggono,2000)

Ion atau Molekul	Konsentrasi	
	m mol/kg air laut	g/ kg air laut
Na <sup>+</sup>	468,500	10,7700
K <sup>+</sup>	10,210	0,3990
Mg <sup>2+</sup>	53,080	1,2900
Ca <sup>2+</sup>	10,280	0,4120
Sr <sup>2+</sup>	0,090	0,0080
Cl <sup>-</sup>	545,900	19,3540
Br <sup>-</sup>	0,840	0,0670
F <sup>-</sup>	0,070	0,0013
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,300	0,1400
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	28,230	2,7120
B(OH) <sub>3</sub>	0,416	0,0257

### 2.4.3. Keasaman (pH) Air Laut

Air laut memiliki tingkat keasaman lebih tinggi pada permukaan. Tingkat keasaman (pH) terbentuk karena kandungan 93% karbon anorganik berupa HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> , 6% berupa CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> dan 1 % berupa CO<sub>2</sub>. Ion Karbonat relatif tinggi pada permukaan dan hampir selalu jenuh dengan kalsium karbonat. Hal ini menyebabkan terjadinya pengendapan jenuh (*calcareous scale*) pada permukaan logam . Konsentrasi CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub>

mempunyai hubungan yang erat dengan pH air laut dalam proses fotosintesa dan oksidasi biokimia dengan reaksi sebagai berikut:



Reaksi dari kiri ke kanan, oksigen terlarut digunakan dan  $CO_2$  dihasilkan.  $CO_2$  yang terlarut akan membuat air lebih asam, hal ini akan menurunkan pH dan juga menurunkan kejenuhan karbonat. Pengendapan kerak terjadi pada pH yang lebih tinggi dimana ion  $OH^-$  dihasilkan selama reduksi oksigen terlarut.

## 2.5. Laju Korosi

Parameter untuk menghitung laju korosi adalah keluaran arus per satuan luas permukaan terbuka yang juga disebut laju pengausan (*wastage*). Juga dinyatakan dengan laju hilangnya logam dalam satuan volume maupun satuan masa per luas permukaan per tahun. Dalam perlindungan korosi dengan metode anoda korban ini, laju korosi dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$C_R = \frac{K \times W}{A \times D \times T} \quad (\text{Tretheway, 1991}) \quad (2.16)$$

dimana :

- $C_R$  = Laju korosi (mm/th)
- $W$  = Massa yang terkorosi (gram)
- $A$  = Luas tercelup ( $cm^2$ )
- $K$  =  $8.76 \times 10^4$
- $T$  = Waktu (jam)
- $D$  = Densitas ( $gram/cm^3$ )

## 2.6. Pengaruh Proses Pembentukan Cara Panas (*flame heating technique*) pada Kekuatan Baja Kelas A-BKI Produksi Karakatau Steel

Teknik perlakuan cara panas dapat dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu pemanasan garis (*line heating*) dan pemanasan setempat (*spot heating*). Pada pemanasan garis operator mengerjakan brander secara linier, sedangkan

pemanasan setempat pemanasan dilakukan satu tempat selama beberapa waktu dan kemudian baru berpindah kebagian lain (Triwilaswandio, 1997).

Pelat yang dipanaskan dan kemudian didinginkan akan menimbulkan tegangan dalam pelat baja tersebut. Tegangan ini dinamakan tegangan thermal. Tegangan ini akan menghasilkan rengangan dan terjadi deformasi tetap, seperti halnya jika pelat diberi gaya-gaya mekanis. Tegangan yang timbul oleh panas juga dapat dimanfaatkan untuk menghilangkan regangan. Berdasarkan hal tersebut maka panas dapat dikontrol hingga diperoleh deformasi pelat yang diinginkan.

Saat pelat dipanaskan sepanjang garis lurus dengan brander maka akan terjadi lekukan kecil sepanjang garis tersebut, dan jika daerah yang dipanaskan tersebut didinginkan dengan air maka lekukan akan tampak lebih jelas. faktor yang mempengaruhi laju pemanasan dan pendinginan akan menjadi faktor penentu lengkungan yang terjadi, antara lain :

- Tipe dan diameter brander
- Jarak antara ujung brander dan permukaan pelat
- Kecepatan jalannya brander
- Metode pendinginan dengan air atau udara
- Laju pendinginan
- Jarak antara pusat pemanasan dan pusat pendinginan

Suhu pemanasan yang direkomendasikan oleh ABS (Chirillo, 1982) dapat dilihat pada Tabel.2.6. berikut ini.

Tabel.2.6. Batas maksimum suhu pemanasan. (Chirillo, 1982)

Jenis Baja	Suhu Pemanasan Maksimum yang diijinkan	Suhu Maksimum Dimulainya Pendinginan dengan Air
<i>Mild Steel</i>	900°C	850°C
<i>High Tensile</i>	900°C 650°C	500°C 650°C

Manfaat teknik pemanasan garis (*line heating*) pada industri galangan kapal adalah sebagai berikut :

- Mengurangi pekerjaan yang menggunakan mesin-mesin berat (*bending* mesin).
- Memperoleh bentuk lengkung yang lebih akurat.
- Mempermudah pemasangan pelat terutama pelat lambung kapal, dengan gaya minimal untuk menghindari distorsi yang disebabkan oleh tegangan-tegangan akibat pengelasan.
- Dapat diaplikasikan untuk membuat pelat lengkung dengan ukuran besar (*bending* mesin memiliki keterbatasan ukuran, atau dibutuhkan mesin bending yang besar untuk pelat besar).
- Memudahkan pekerjaan perakitan konstruksi dengan menghilangkan deformasi pada setiap tahap pekerjaan.

Dalam pelaksanaan pemanasan garis, suhu pemanasan harus dijaga dibawah titik transformasi A1. Material logam jika dipanasi beberama lama maka akan terjadi perubahan struktur kristal dan pertumbuhan besar butir (*grain size*) (Zakharov, 1962). Pemanasan dalam jangka waktu lama, dapat terjadi proses transformasi metalurgi yang sangat tergantung pada laju pendinginan. Dalam pengaplikasian praktis *line heating*, pemanasan dan pendinginan dilakukan dalam selang waktu yang sangat pendek sehingga hanya ada sedikit waktu yang memungkinkan terjadinya perubahan molekul dan pertumbuhan butir-butir, Jika pemanasan dapat dikontrol dengan baik, tidak akan terjadi transformasi struktur kristal.

Penelitian *line heating* yang dilakukan oleh saudara Triwilaswandio dan Wing ini menggunakan benda uji pelat baja kelas A-BKI produksi PT. Krakatau Steel (komposisi : C 17,4%, S 2.5%, Mn , P 1.9%, Al 6,8%, RE 320 N/mm<sup>2</sup>, RM 477N/mm<sup>2</sup>. A 25%. Dalam standar JIS (SS-41). Dengan ukuran pelat 300mm x 300mm dan tebal 10mm, 13mm, 16mm, 20mm. Uji yang dilakukan adalah: Uji Tarik, Uji Impak, Uji Fraktur dan Uji Metalografi. Masing-masing benda uji dilakukan pemanasan garis.

Pengujian Tarik untuk mengetahui sifat mekanis statis material yaitu tegangan ultimate ( $\sigma_{ult}$ ) Tegangan yield ( $\sigma_y$ ) dan rengangan. Pengujian impak, untuk mengetahui kekuatan material dalam menerima beban tiba-tiba.

Pengujian fraktur, untuk mengetahui ketanguhan material/kemampuan material menahan intensitas tegangan yang diberikan pada ujung retak dan untuk menahan perambatan retak pada pembebanan statis saat kondisi *plane strain*. Pengujian ini menggunakan standart ASTM E 399. Pengujian Metalografi, untuk mengetahui struktur mikro.

Proses *line heating* dilakukan sampai suhu 900°C dan kemudian didinginkan dengan cepat menggunakan air. Pekerjaan *line heating* ini dapat menimbulkan perubahan struktur mikro pelat baja yang dipanaskan. Pada suhu ruang 30°C struktur mikro baja tersusun dari butir-butir perlit yang merupakan gabungan dari fase ferrite-simentit, Apabila baja dipanaskan pada suhu A1, atau lebih tinggi maka akan terjadi transformasi dari perlit menjadi austenit. Baja karbon memiliki suhu transformasi A1, 723°C, apabila baja dipanaskan diatas suhu A1, kemudian didinginkan dengan cepat ke suhu 200-300 °C akan terjadi transformasi martensit. Pada peristiwa ini Austenit yang seharusnya bertransformasi ferrite-simentit (perlit) akan bertransformasi menjadi struktur martensite.(Zakharov,1962).

Martensite ini terjadi saat baja dipanaskan pada suhu diatas A1, terjadi proses kristalisasi sekunder, yaitu terjadi dekomposisi austenite (penghilangan karbon dalam besi-gamma)(Amstead, 1992). Tetapi karena pendinginan dilakukan dengan cepat pada suhu yang rendah, dekomposisi ini dapat berlangsung dengan sempurna, karena dekomposisi atom-atom karbon ini merupakan suatu proses difusi yang tidak dapat berlangsung pada suhu rendah. Pada suhu rendah laju difusi atom-atom karbon sangat lambat. Sedangkan saat pendinginan terjadi pula perubahan kisi-kisi ruang besi gamma menjadi besi alfa. Perubahan kisi-kisi ruang ini karena bukan merupakan proses difusi. Laju pendinginan yang tinggi pada suhu rendah (200-300°C), kisi-kisi ruang besi berubah dengan bebas. Dengan demikian setelah akhir proses, atom-atom karbon akan tetap tinggal dalam ruang besi alfa. Sifat yang khas dari martensit adalah kekerasan dan kuat tarik yang tinggi serta kuat impak rendah. Hal ini dikarenakan pada struktur martensit banyak terdapat distorsi kisi-kisi ruangnya akibat proses geser sehingga menghalangi terjadinya deformasi plastis.

Apabila pemanasan baja dilakukan dibawah suhu A1 ( $723^{\circ}\text{C}$ ) tidak terjadi perubahan butir-butir perlit menjadi austenit, karena tidak terdapat austenite dalam baja maka tidak terjadi pula proses transformasi martensite. Dengan demikian suhu pemanasan pada pelat harus dijaga agar tetap dibawah suhu transformasi A1 sehingga mencegah timbulnya austenit dalam struktur baja.

Pengujian tarik pada benda uji yang telah dilakukan pemanasan garis (*line heating*), kekuatan tarik nya mengalami kenaikan. Hal ini karena setelah pemanasan garis terjadi perubahan struktur pada spesimen menjadi martensit yang memiliki sifat kuat tarik. Kekuatan impak spesimen lebih rendah dibandingkan material uji yang tidak mengalami pemanasan garis.

Perbedaan kekuatan tarik dari spesimen yang memiliki ketebalan berbeda sangat bervariasi antara  $41 \text{ kg/mm}^2$  sampai  $52 \text{ kg/mm}^2$ . Lebih terperinci dapat dilihat hasil uji pada Tabel 2.7. berikut.

Tabel.2.7. Hasil uji tarik dan impak (Triwilaswandio,1997)

Proses	Harga rata-rata		
	Kuat Tarik ( $\text{kg/mm}^2$ )	Kuat Impak ( $\text{Joule/mm}^2$ )	Klc ( $\text{psi.inch}^{1/2}$ )
Tanpa Pemanasan	44,642	1,633	5467,3
Sesudah Pemanasan	46,645	1,518	5788,4
Kenaikan/Penurunan (%)	+ 4,487	-7,042	+5,918

## 2.7. Analisa Peningkatan Sifat Tegang Untuk Pembengkokan Pelat *Line Heating* dengan Pertimbangan Perubahan Fase Baja

Deformasi yang terjadi pada pelat baja akibat *line heating* telah banyak di kaji menggunakan 2 pendekatan yaitu: analisa *elastoplastic thermal* menggunakan FEM masukan panas langsung, yang kedua metode beban ekuivalen berdasarkan sifat tegang. Namun kedua metode ini memiliki keterbatasan, asumsi yang tepat terhadap daerah yang masih memiliki sifat tegang (Jang Dc, 1982). Lebar dan dalam HAZ (*heat affected zone*) memiliki peranan dalam pembentukan sifat tegang pelat baja hal ini terungkap pada eksperimen *welding* oleh Satoh, Matsui dan Teray. Pada proses *line heating* (Jang Dc, 1982) menyarankan daerah yang masih memiliki sifat tegang dapat



disubstitusi dengan daerah yang memiliki sifat luluh mekanika. Daerah ini hampir sama dengan temperatur yang melebihi  $A_{cl}$  (temperatur yang dibutuhkan untuk mulai terbentuknya Austenite yang terbentuk selama pemanasan berlangsung). Mereka mendapatkan sifat tegang dengan penambahan tegangan plastis sisa pada proses pemanasan dan pendinginan dari sumber panas berupa titik (*spot heat*). Penggunaan sifat tegangan ini untuk menghitung gaya-gara yang bekerja.

Karakteristik *line heating* yang terdapat di galangan kapal sangat berbeda dengan proses pemanasan yang diakibatkan karena pengelasan. Pertama karena pada pengelasan, panas yang dihasilkan sejalan dengan proses pengelasan. Tetapi pada Galangan Kapal proses *line heating* memiliki gerakan mengayun seperti menenun dan sumber masukan panas beragam. Kedua keterbatasan eksternal struktur pengelasan mempegaruhi analisa deformasi, sedangkan *line heating* batasan eksternal ini sedikit sekali. Ketiga pada proses pengelasan baja mesti luluh agar dapat tersambung kembali, pada proses *line heating* pelat baja tidak luluh. Terakhir daerah pengelasan didinginkan dengan udara, pada *line heating* pendinginan paksa dengan air. Pada proses pendinginan baja dengan air ini, perubahan fase struktur kristal baja karena pemanasan tidak dapat kembali seperti semula. Fase struktur kristal baja pada proses pendinginan dengan air dapat berubah ke struktur kristal baja martensite.

Metode sifat tegang merupakan suatu bentuk sederhana dari analisis *elastoplastic* panas. Baja ringan (*mild steel*) yang terkena temperatur tinggi akan menghasilkan tegangan sisa. Tegangan yang tidak tercangkup pada tegangan plastis, tegangan thermal, tegangan fase tranformasi, dan transformasi yang menyebabkan tegangan plastis, disebut sebagai tegangan inheren (masing memiliki sifat tegangan). Integritas tegangan ini dapat dilihat dalam persamaan 2.6, berikut :

$$\varepsilon^o = \varepsilon^{th} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^{ph} + \varepsilon^{tr} = \varepsilon^{total} - \varepsilon^{el} \quad (\text{referensi}) \quad 2.6$$

Dimana:

$$\varepsilon^{th} = \text{Thermal strain}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon^{pl} &= \text{Plastic strain} \\ \varepsilon^{ph} &= \text{Phase transformation strain} \\ \varepsilon^{tr} &= \text{transformation induce plastic strain} \\ \varepsilon^{el} &= \text{elastic strain}\end{aligned}$$

## 2.8. Akuisisi Informasi *Line Heating* untuk Pembentukan Pelat

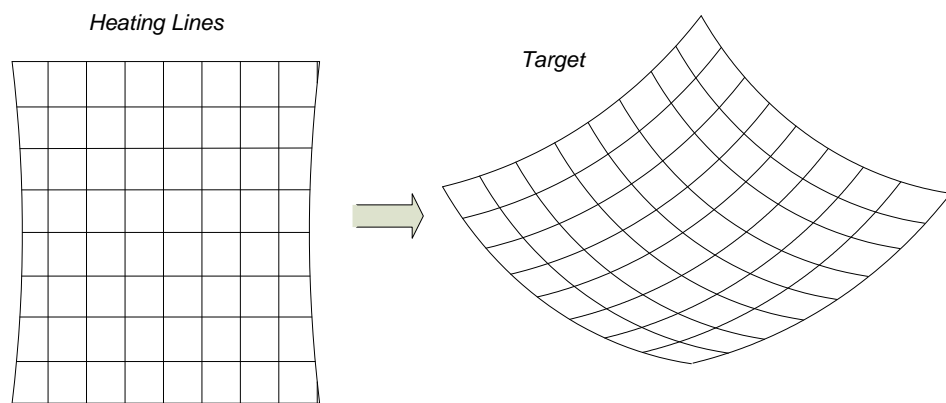
### Secara Automatis

Chang, Sung dan Dae Eun Ko, dalam penelitiannya tentang pembentukan pelat-pelat lengkung pada industri galangan kapal yang masih menggunakan banyak jam orang dan tenaga kerja terampil, sehingga ongkos produksi pelat masih mahal. Pemanfaatan informasi *line heating* dalam proses pembentukan pelat lengkung akan dapat mengurangi ongkos operasional produksi pabrikasi pelat lengkung. Dalam percobaan berdasarkan proses *line heating* yang pernah dilakukan, maka panas yang dipakai dianggap tetap serta beban bekerja pada model dapat dilihat dalam tabel 2.8. berikut.

Tabel.2.8. Pengkondisian panas dan gaya (Jang D C, 2007 )

Kecepatan pemanasan	0,3889 cm/s
Panas masuk	2250 cal/s
Tegangan inheren	0,00639
Lebar garis pemanasan	20 mm
Bending momen melintang	220,8 kgf/mm
Gaya melintang	31,9 kgf/mm
Bending momen memanjang	25534,1 kgf/mm
Gaya memanjang	3684,2 kgf

*Line heating* dengan arah pemanasan berbentuk anyaman dan target permukaan lengkung yang akan diperoleh, dapat dilihat dalam Gambar.2.25. berikut ini.



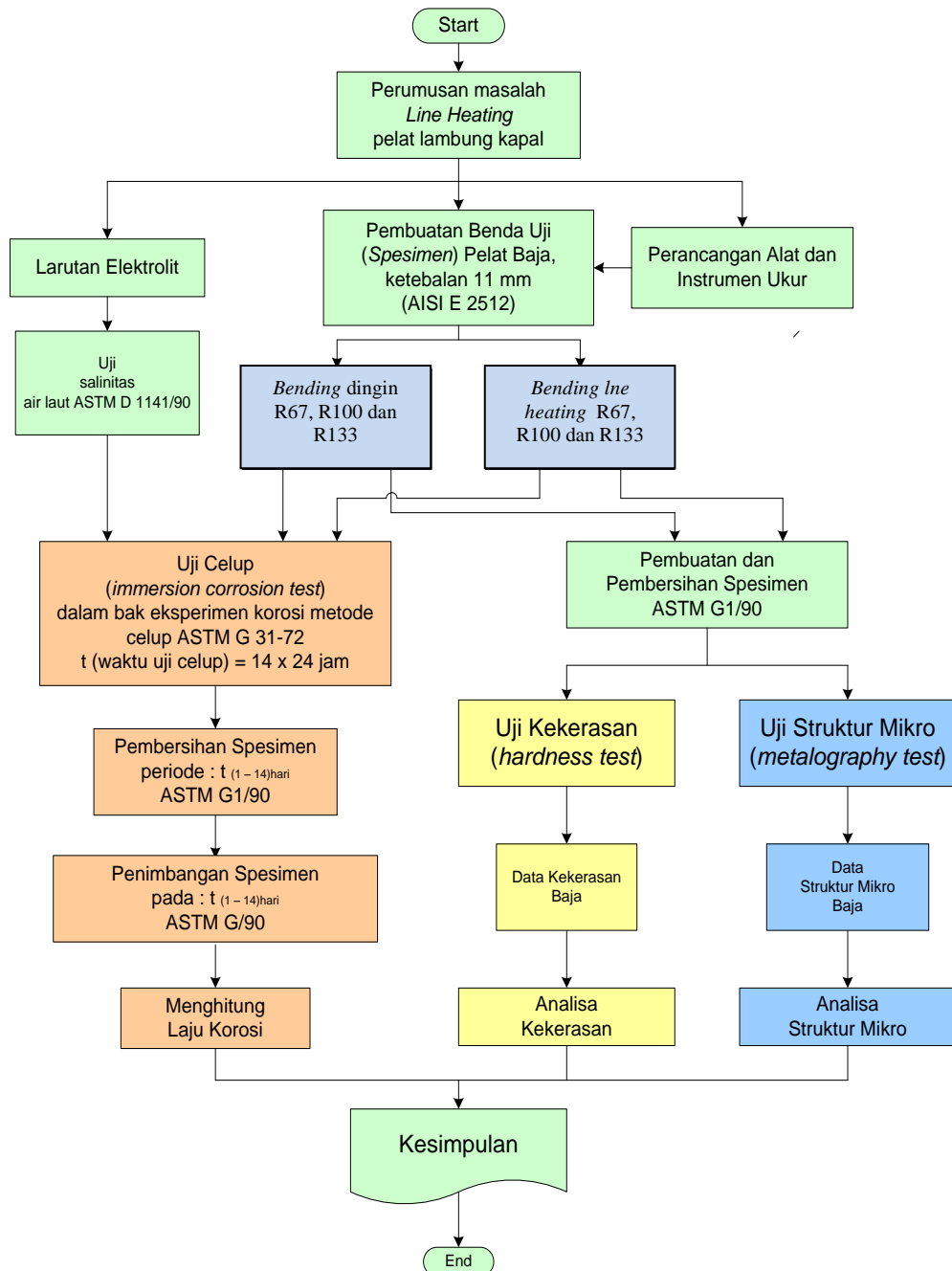
Gambar.2. 25. Garis pemanasan dan target permukaan lengkung.  
( Jang D C, 2007).

### BAB III

## METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen di laboratorium dimana alur penelitian dapat disajikan dalam Gambar.3.1.



Gambar.3.1. Alur Penelitian (flow chart).

### 3.2. Desain Alat dan Instrumentasi Penelitian

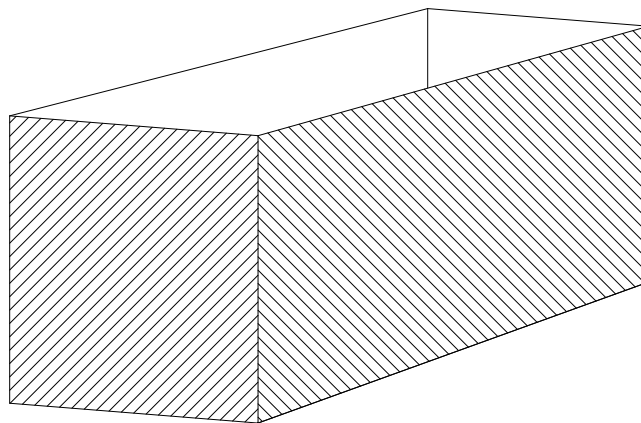
Desain penelitian yang dilakukan adalah eksperimen laboratorium antara lain uji celup (*immersion corrosion test of metal*), uji kekerasan dan pengamatan struktur mikro untuk memperoleh data sifat material dan korosi yang terjadi terhadap benda uji yang menggunakan lima tingkat pemanasan proses *bending line heating*.

#### 3.2.1. Perancangan Alat

Alat yang digunakan dalam eksperimen laboratorium antara lain adalah :

a. Kotak Plastik

Kotak plastik (Gambar.3.2.) digunakan untuk menampung 60 liter larutan elektrolit (air laut) dengan ukuran 55 cm x 38 cm x 33 cm )



Gambar.3.2. Kotak Plastik

b. Larutan NaOH, Aquades

Larutan NaOH 10 % digunakan sebagai bahan pembersih sesuai dengan standart ASTM G1-90.

c. Pompa Air

Pompa air digunakan untuk memberikan efek gelombang dalam larutan elektrolit (air laut ) dengan spesifikasi : P 1800, 220/240, 50 hzt.

d. Gerinda dan Ampelas

Gerinda digunakan untuk menghaluskan permukaan hasil pemotongan benda uji dan ampelas digunakan untuk menghasilkan permukaan benda uji agar rata dan sejajar.

e. Gergaji Potong Besi

Gergaji potong digunakan untuk memotong pelat baja kemudian dihaluskan menggunakan mesin gerinda.

f. Gas Welding

Gas welding digunakan sebagai pemanas saat membuat *bending line heating*. Gas welding dilengkapi dengan tabung gas LPG atau Acetelin dan oksigen, brander sebagai penghasil panas.

g. Selang Air

Selang air digunakan untuk menyalurkan air sebagai media pendingin saat proses *bending line heating* berlangsung.

### 3.2.2. Instrumen Ukur

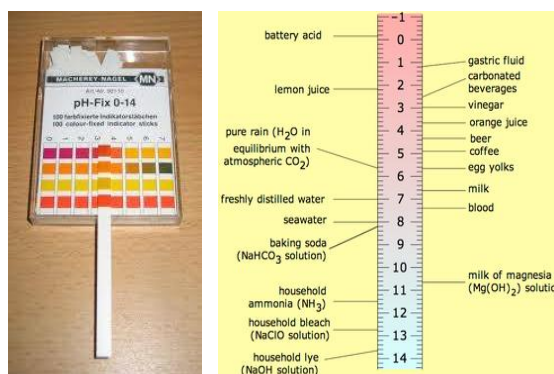
Instrumen ukur yang digunakan dalam eksperimen laboratorium antara lain adalah :

a. Mikrometer

Mikrometer digunakan untuk mengukur ketebalan spesimen, dengan tingkat ketelitian 0,01 mm.

b. pH Indikator

pH indikator yang dipakai berupa kertas lakmus seperti Gambar.3.3. berikut



Gambar.3.3. Kertas pH indikator

c. Jangka Sorong

Jangka sorong, digunakan untuk mengukur *specimen*/benda uji (pelat baja), tingkat ketelitian 0,001 inch.

d. Timbangan berat

Timbangan berat, digunakan untuk mengukur berat spesimen.

Spesifikasi alat Tanita KD 1160, 2000 gram (ketelitian:1gram).

e. Termometer Infrared

Termometer infrared, merupakan alat ukur suhu digital digunakan untuk mendapatkan data suhu pemanasan saat melakukan *bending line heating*.

Spesifikasi alat :

- a.Temperatur range : -50 s/d 1000 (°C)
- b.Taget ratio : 8:1
- c. Presisi :  $\pm 1,5\%$   $\pm 1,5$ .

### 3.2.3.Larutan Elektrolit

Cairan elektrolit yang digunakan sesuai dengan standar ASTM D1141-90 (*standard specification for substitute ocean water*), dan Volume elektrolit sesuai ASTM G71-81 (*standard guide for conducting and evaluating galvanic corrosion test in electrolytes*) adalah  $40 \text{ cm}^3 : 1 \text{ cm}^2$  baja yang tercelup, dalam eksperimen ini elektrolit air laut digunakan:  $60 \text{ cm}^3$ , Suhu ruangan  $25^\circ\text{C}$ , dan suhu media dalam bak elektrolit  $29^\circ\text{C}$ . Salinitas  $37 \text{ ‰}$  dan kandungan garam dalam Tabel.3.1.

Tabel 3.1. Kandungan garam terlarut (*gram/l*) air laut  
Laboratorium Terpadu, Ilmu Kelautan –Undip.2009.

Garam	Salinitas (‰)
	37
<i>NaCl</i>	25.93
<i>MgCl<sub>2</sub></i>	5.497
<i>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i>	4.090
<i>CaCl<sub>2</sub></i>	1.230
<i>KCl</i>	0.735
<i>NaHCO<sub>3</sub></i>	0.201
<i>KBr</i>	0.101
<i>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></i>	0.027
<i>SrCl<sub>2</sub></i>	0.026
<i>NaF</i>	0.003

### 3.3. Material Benda Uji

#### 3.3.1. Pelat Baja

Benda uji (spesimen) adalah pelat baja *Grade A* (BKI) setara dengan AISI E 2512. Pelat baja dipersiapkan dengan ketebalan 11 mm. Pelat baja spesimen dibersihkan untuk menghilangkan kotoran pada pelat baja agar korosi awal hilang, sesuai dengan standar ASTM G1-90, "*Standart Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*". Komposisi spesimen pada Tabel.3.2. dan kekuatan tarik Tabel.3.3.

Tabel 3.2. Komposisi kimia pelat baja

Unsur	Kadar Maks. (%)
<i>C</i>	0.14
<i>Mn</i>	0.66
<i>P</i>	0.026
<i>S</i>	0.017
<i>Si</i>	0.27

Tabel 3.3. Kekuatan tarik pelat baja

Sifat Mekanik Tarik	
<i>Yield Strength (YS)</i>	308 N/mm <sup>2</sup> - 327 N/mm <sup>2</sup>
<i>Tensile Strength (TS)</i>	438 N/mm <sup>2</sup> - 464 N/mm <sup>2</sup>
<i>Elongation</i>	26-29 %

#### 3.3.2. Bending Dingin

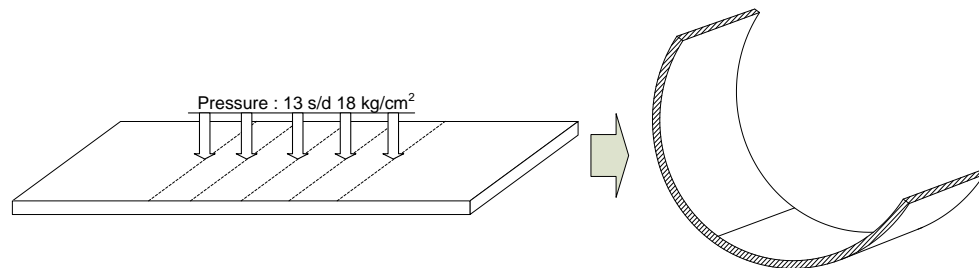
Material Uji (*speciment*) pelat baja yang akan diuji setelah dibersihkan dan dipotong dengan ukuran 300 mm x 150 mm x 11 mm (pelat baja datar), terlebih dahulu dibending dingin dengan ukuran radius bending sesuai dengan radius pelat bilga kapal (1000, 1500 dan 2000 mm) kemudian diskala 1:15 sehingga menjadi :

1. R 133
2. R 100`
3. R 67

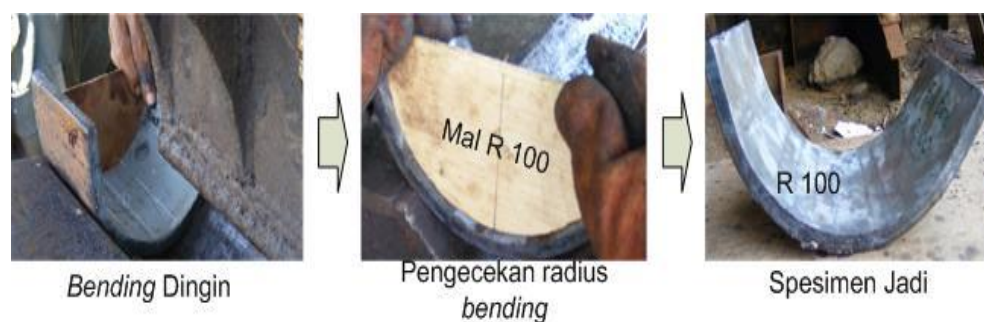
Untuk mendapatkan *bending* dengan radius R. 133, R.100 dan R. 67 mm (dibuat mal radius) lalu diberikan tekanan segaris pada pelat datar secara bertahap seperti Gambar.3.4, sampai di dapatkan radius *bending* sesuai



dengan mal radius yang telah disiapkan , dengan besar tekanan 13 kg/cm<sup>2</sup> sampai dengan 18 kg/cm<sup>2</sup>, hal ini dilakukan agar material tidak patah saat dibending. Proses persiapan benda uji *bending* dingin seperti terlihat di Gambar.3.5.



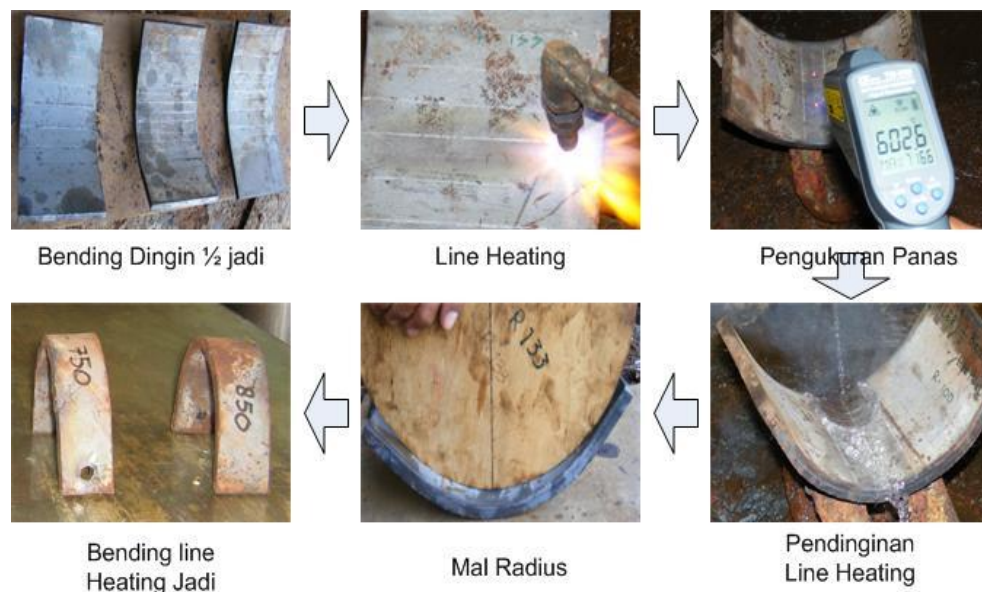
Gambar.3.4. Persiapan benda uji



Gambar.3.5. Proses pembuatan benda uji *bending* dingin.

### 3.3.3. *Bending Line Heating*

*Line heating* dilakukan oleh pekerja yang terampil melakukan pekerjaan *bending line heating* di perusahaan Dok dan Galangan Kapal, sehingga diharapkan hasilnya dapat mendekati kondisi pemanasan sesungguhnya. Variasi temperatur pemanasan yang digunakan yaitu 400 °C, 500 °C, 600 °C, 750 °C dan 850 °C. Pengukuran suhu dilakukan dengan memakai termometer infrared. Kecepatan blander dan nyala api dianggap sama untuk semua spesimen uji. Proses pendinginan dilakukan dengan menggunakan media air (disemprot) dan media udara (didiamkan). Proses *Bending line heating* pada Gambar.3.6 berikut.



Gambar.3.6. Proses pembuatan benda uji *bending line heating*

Jumlah spesimen yang dibuat dapat dilihat dalam tabel.3.4 berikut :

Tabel.3.4.Jumlah benda uji yang dibuat adalah sebanyak 16 buah:

Radius	400°C	500°C	600°C	750°C	850°C
R. 133	1	1	1	1	1
R. 100	1	1	1	1	1
R. 67	1	1	1	1	1
datar	1				

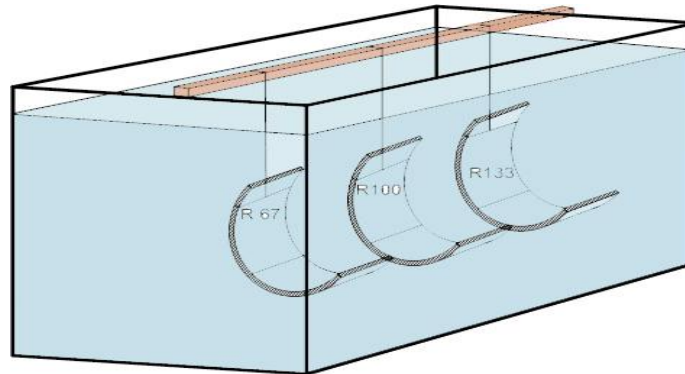
### 3.4. Uji Celup

Uji celup (*immersion corrosion test*) dilakukan untuk mengetahui laju korosi pelat baja. Standar uji celup ASTM G31-72 (*standart for immersion corrosion test of metal*) dan sebelum kegiatan ini dilakukan pelat baja (benda uji) dibersihkan untuk menghilangkan kotoran pada pelat baja agar terhindar dari terjadinya korosi awal, sesuai dengan standar ASTM G1-90, ”*Standart Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*”

#### 3.4.1. Susunan Benda Uji

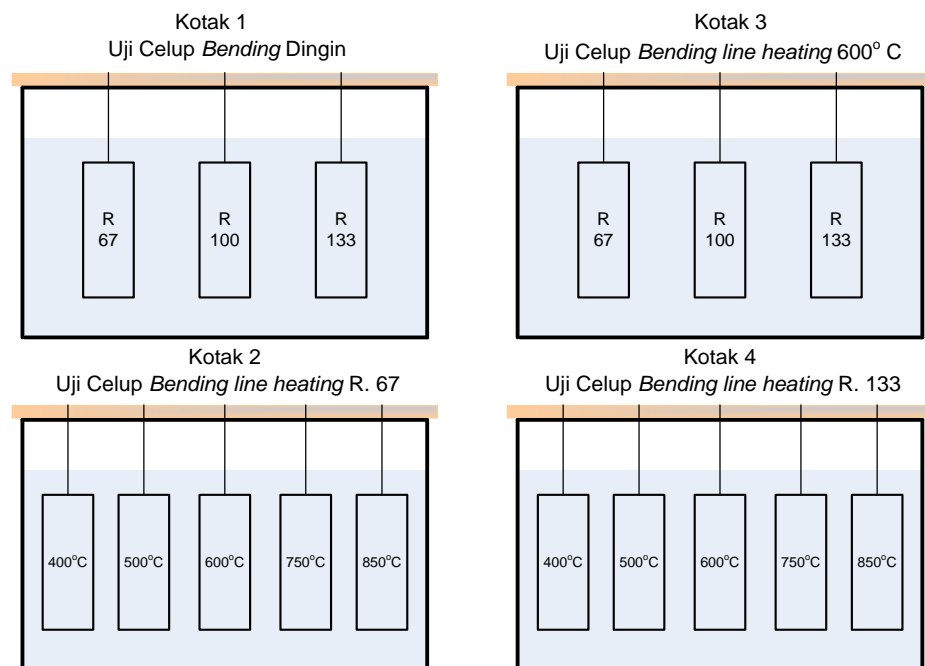
Dalam eksperimen laboratorium ini susunan spesimen dibagi dalam 4 bak air (kotak plastik), masing-masing spesimen dicelupkan secara

keseluruhan dan digantungkan ke kayu yang ditempatkan di atas mulut bak air menggunakan tali pengikat seperti Gambar.3.7 berikut.



Gambar.3.7.Posisi benda uji pada uji celup.

Susunan spesimen yang dibagi dalam 4 bak air (kotak plastik) dapat dilihat dalam Gambar.3.8. berikut.

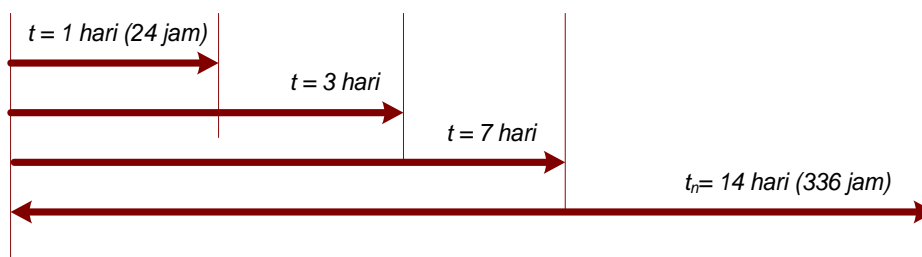


Gambar.3.8. Susunan benda uji dalam bak uji celup.

### 3.4.2. Waktu Uji Celup.

Waktu uji celup yang digunakan dalam uji korosi berdasarkan standar ASTM G 31-72 (*standard recommended practice for laboratory immersion corrosion testing of metal*) selama 336 jam (14 hari, Athanasius P.

Bayuseno), diagram waktu uji celup dapat dilihat dalam Gambar.3.9, berikut.



Gambar.3.9. Waktu pelaksanaan uji celup

### 3.4.3. Pengambilan Data

Pengambilan data korosi dengan jalan penimbangan spesimen (pelat baja) dengan periode : 1,3,7,14 hari. Sebelum penimbangan spesimen terlebih dahulu dibersihkan. Perlakuan selama pembersihan adalah dengan jalan mencelupkan spesimen dalam larutan NaOH selama 5 menit, kemudian diangkat dan dicelupkan dalam aquades selama 5 menit kemudian dikeringkan dengan *Oven*, baru dilakukan penimbangan dan data dicatat dalam tabel 3.5. berikut .

Tabel.3.5. Data uji celup korosi pelat baja.

[illegible]

### 3.5. Menghitung Laju Korosi

Setelah data eksperimen diperoleh maka selanjutnya dilakukan perhitungan laju korosi yang dapat dinyatakan dalam rumus sebagai berikut :

$$C_R = \frac{K \times W}{A \times D \times T} \dots\dots\dots (\text{Trethewey, 1991})$$

dimana :  $C_R$  = Laju korosi (mm/tahun)  
 $W$  = Massa yang terkorosi (gram)  
 $A$  = Luas tercelup (cm<sup>2</sup>)  
 $K$  =  $8.76 \times 10^4$ , konstanta  
 $T$  = Waktu (jam)  
 $D$  = Densitas (gram/cm<sup>3</sup>) untuk baja = 7,86 gram/cm<sup>3</sup>

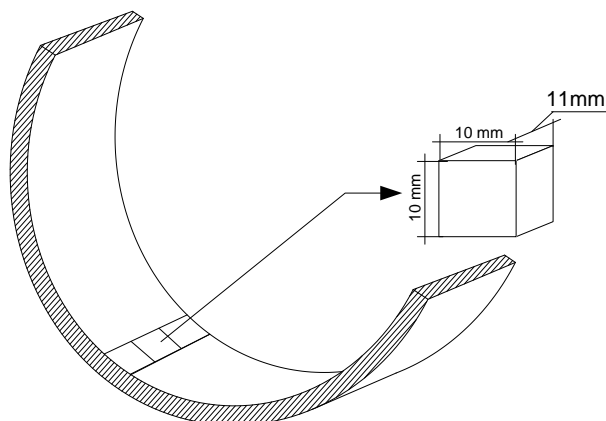
### 3.6. Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakuan dengan metode *Rockwell*, untuk memperoleh nilai kekerasan dari benda uji setelah mengalami *bending* dingin maupun *bending line heating*.

#### 3.6.1. Benda Uji Kekerasan

Benda uji kekerasan dibuat dengan ukuran 10 mm x 10 mm x 11 mm, seperti yang terlihat dalam Gambar. 3.10. yang berasal dari benda uji ;

- bending* dingin : R. 67, R. 100 dan R. 133
- bending line heating* 600°C : R. 67, R. 100 dan R. 133
- Pelat baja normal, sebagai pembanding.



Gambar.3.10. Pembuatan benda uji kekerasan.

Benda uji ini kemudian di haluskan hingga mengkilat dan diperoleh permukaan yang sejajar dan rata pada masing-masing sisi benda uji menggunakan mesin ampelas dan ampelas tangan : 200, 400, 1000 dan 1500, lalu baru ditempatkan di mesin uji kekerasan seperti Gambar.3.11. dan indenter pada tabel.3.6.



Gambar.3.11. Mesin uji kekerasan (Rockwell).

Tabel.3.6. Skala Rockwell yang digunakan.

Scale	Indenter	Minor Load $F_0$ kgf	Major Load $F_1$ kgf	Total Load $F$ kgf	Value of $E$
A	Diamond cone	10	50	60	100

### 3.6.2. Pengambilan Data

Dalam metode rockwell, nilai kekerasan berdasarkan kedalaman penekanan indenter dan hasilnya dapat langsung dibaca pada jarum penunjuk indikator di mesin Rockwell.

Data uji kekerasan diperoleh dengan memperhatikan jarum penunjuk sebagai indikator tingkat kekerasan benda uji dan kemudian dicatat dalam tabel.3.7, yang berisikan nomor urut pengujian, benda uji dengan perlakuan *bending* dingin, *bending line heating* dengan tingkat pemanasan 600°C dan pelat normal.

Tabel. 3.7. Data uji kekerasan

No	Bending dingin			Bending line heating 600°C			Normal
$h_1$	$h_1$	$h_1$	$h_1$	$h_1$	$h_1$	$h_1$	
$h_2$	$h_2$	$h_2$	$h_2$	$h_2$	$h_2$	$h_2$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
$h_n$	$h_n$	$h_n$	$h_n$	$h_n$	$h_n$	$h_n$	

### 3.6.3. Analisa Kekerasan

Setelah data terkumpul kemudian dilakukan analisa untuk memperoleh gambaran tentang kekerasan benda uji.

Nilai Kekerasan Rockwell (HR):

$$HR = E - e \quad 3.1.$$

$F_0$  = beban awal (*preliminary minor load in kgf*)

$F_1$  = Beban tambahan (*additional major load in kgf*)

$F$  = Beban total (*total load in kgf*)

$e$  = Penambahan kedalaman penetrasi dari beban mayor  $F_1$ ,  
diukur dalam unit 0.002 mm

$E$  = Konstanta tergantung dari indenter: 100 unit untuk *diamond indenter*, 130 unit untuk *steel ball indenter*.

### Nilai Keseksamaan

Deviasi ( $\delta HR$ ):

$$\delta HR = \sqrt{\frac{\sum (HR - \overline{HR})^2}{n(n-1)}} \quad 3.2$$

Dimana :  $n$  = banyaknya percobaan

Nilai sesungguhnya ( $NS$ ) :

$$NS = \overline{HR} \pm \delta HR \quad 3.4$$

Ralat Nisbi ( $RN$ ) :

$$RN = \frac{\delta \overline{HR}}{\overline{HR}} \times 100\% \quad 3.5$$

Keseksamaan ( $K$ )

$$K = \left( 1 - \frac{\delta HR}{HR} \right) \times 100\% \quad 3.6$$

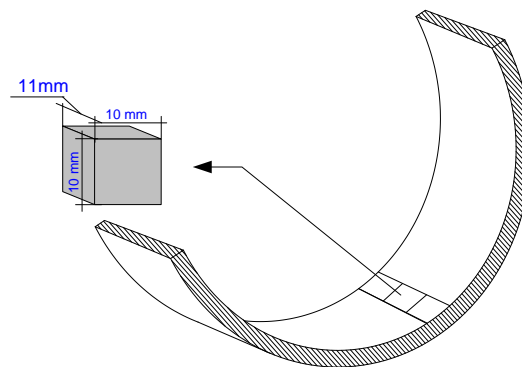
### 3.7. Uji Metalografi

Uji Metalografi untuk melihat perubahan struktur baja yang terjadi setelah benda diperlakukan *bending dingin* dan *bending line heating*. Perubahan struktur ini sejalan dengan perubahan yang terjadi terhadap kekerasan material.

#### 3.7.1. Benda Uji Metalografi

Benda uji metalografi dibuat dengan ukuran 10 mm x 10 mm x 11 mm yang berasal dari: *Bending dingin* : R. 67, R. 100 dan R. 133, *Bending line heating* 600°C : R. 67, R. 100 dan R. 133 dan Pelat baja normal, serta bentuk benda uji sesuai dengan gambar 3.12.

Benda uji ini kemudian dihaluskan hingga mengkilat dan diperoleh permukaan yang sejajar dan rata pada masing-masing sisi benda uji menggunakan mesin ampelas dan ampelas tangan : 200, 400, 1000 dan 1500, lalu dietsa dengan mencelupkannya dalam larutan HNO<sub>3</sub> dan Alkohol (9 ml; 1 ml), kemudian baru ditempatkan pada mikroskop optik dalam Gambar.3.13 dengan tingkat pembesaran 500 kali.



Gambar.3.12. Pembuatan benda uji metalografi.





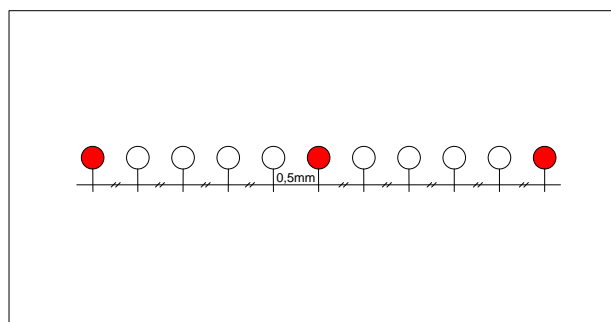
Gambar.3.13. Mikroskop Optik

### 3.7.2. Pengambilan Data

Data hasil uji metalografi berupa gambar mikro struktur dengan posisi pengambilan gambar dengan kordinat seperti yang terlihat dalam Gambar.3.14 sampai dengan Gambar.3.20.

#### a. Normal

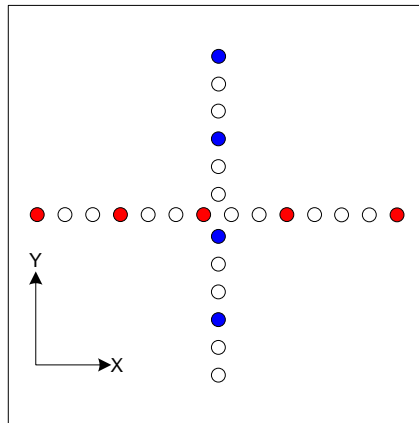
Arah pengambilan gambar pada uji metalografi 10 – 0 – 5 , dengan jarak 0,5 mm dan pembesaran 500 kali.



Gambar.3.14. Posisi gambar metalografi normal

#### b. Bending dingin R.67

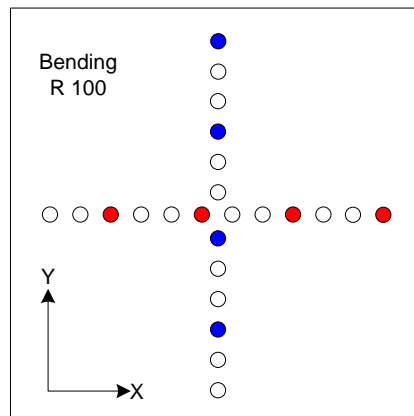
Arah pengambilan gambar pada uji metalografi sumbu x adalah 14 – 11 – 8 – 3 – 7 , dan sumbu y adalah 6 – 3 – 7 – 10 dengan jarak 0,5 mm dan pembesaran 500 kali.



Gambar.3.15. Posisi gambar *bending* dingin R 67

c. *Bending R 100 mm*

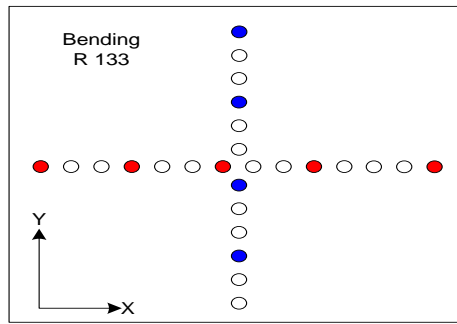
Arah pengambilan gambar pada uji metalografi sumbu x adalah 10 – 7 – 3 – 6 , dan sumbu y adalah 6 – 3 – 7 – 10 dengan jarak 0,5 mm dan pembesaran 500 kali.



Gambar.3.16. Posisi gambar *bending* dingin R 100

d. *Bending R 133 mm*

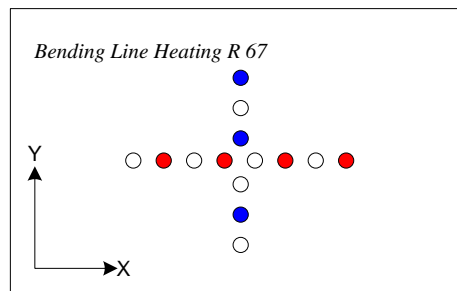
Arah pengambilan gambar pada uji metalografi sumbu x adalah 14 – 11 – 8 – 3 – 7 , dan sumbu y adalah 6 – 3 – 7 – 10 dengan jarak 0,5 mm dan pembesaran 500 kali.



Gambar.3.17. Posisi gambar *bending* dingin R 133

e. *Bending Line Heating R 67 mm*

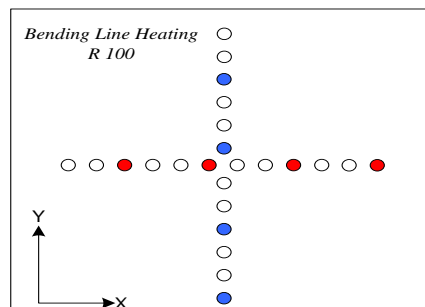
Arah pengambilan gambar pada uji metalografi sumbu x adalah 7 – 5 – 2 – 4 , dan sumbu y adalah 3 – 1 – 5 dengan jarak 0,5 mm dan pembesaran 500 kali.



Gambar.3.18. Posisi gambar *bending line heating* R 67

f. *Bending Line Heating R 100 mm*

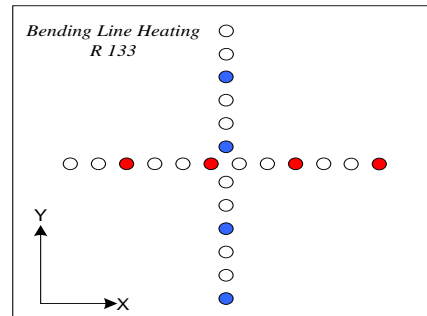
Arah pengambilan gambar pada uji metalografi sumbu x adalah 10 – 7 – 3 – 6 , dan sumbu y adalah 12 – 9 – 1 – 4 dengan jarak 0,5 mm dan pembesaran 500 kali.



Gambar.3.19. Posisi gambar *bending line heating* R 100

g. *Bending Line Heating R 133 mm*

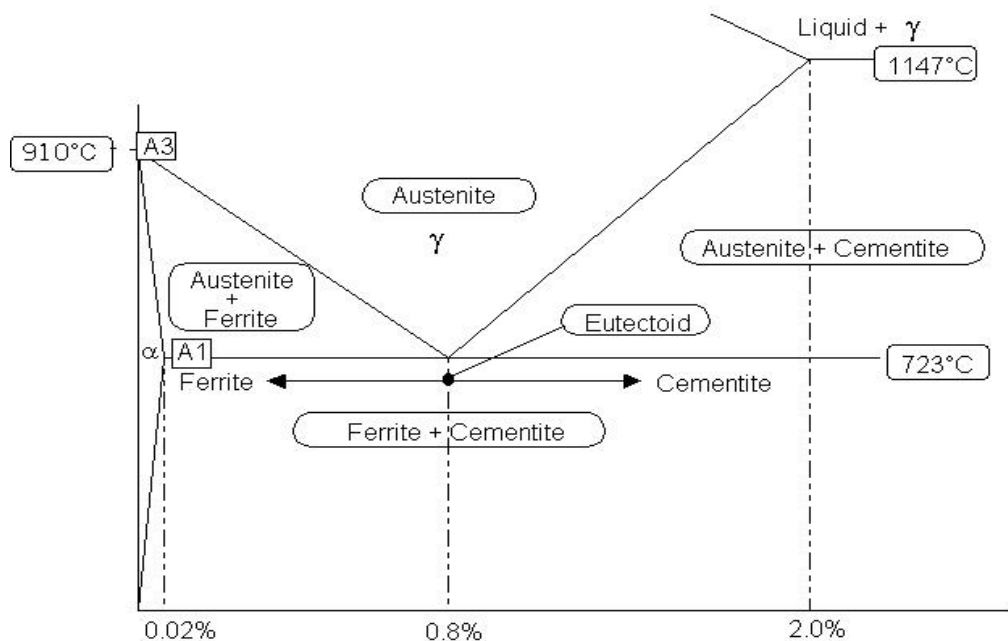
Arah pengambilan gambar pada uji metalografi sumbu x adalah 10 – 7 – 3 – 6 , dan sumbu y adalah 12 – 9 – 1 – 4 dengan jarak 0,5 mm dan pembesaran 500 kali.



Gambar.3.20. Posisi gambar *bending line heating* R 133.

### 3.7.3. Analisa Metalografi

Analisa metalografi digunakan untuk mengetahui atau menunjukkan struktur baja dari suatu logam ataupun paduan berdasarkan diagram fasa. Untuk memperoleh gambaran hubungan antara struktur dan susunan kimia atau sifat – sifat mekanis pada waktu pengamatan struktur mikro berdasarkan diagram fasa baja ringan ( kandungan C < 2%) pada Gambar. 3.21, sebagai berikut.



Gambar.3.21. Diagram fasa pelat baja.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Data dan Pembahasan Uji Korosi

Data uji celup diperoleh dengan jalan menimbang spesimen pada waktu ekspose hari ke-1 ( $t_1$ ), hari ke-3 ( $t_3$ ), hari ke-7( $t_7$ ) dan hari ke-14 ( $t_{14}$ ). Persiapan spesimen uji celup ukuran : 300 mm x 150 mm x 11 mm (pelat baja datar), kemudian *bending* dingin dan *bending line heating* dengan ukuran radius bending sesuai dengan radius pelat bilga.

##### 4.1.1. Laju Korosi

Laju korosi yang dialami oleh spesimen uji celup di hitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$C_R = \frac{K \times \Delta W}{A \times D \times T} \quad mm/tahun \quad (4.1)$$

Dimana:

$K$  = Konstanta =  $8,76 \times 10^4$

$\Delta W$  = Selisih berat awal dan berat akhir (gram)

$A$  = Luas pelat lambung kapal yang tercelup air laut ( $cm^2$ )

$D$  = Densitas pelat baja =  $7,86 \text{ (gram/cm}^3\text{)}$

$T$  = Umur proteksi (jam)

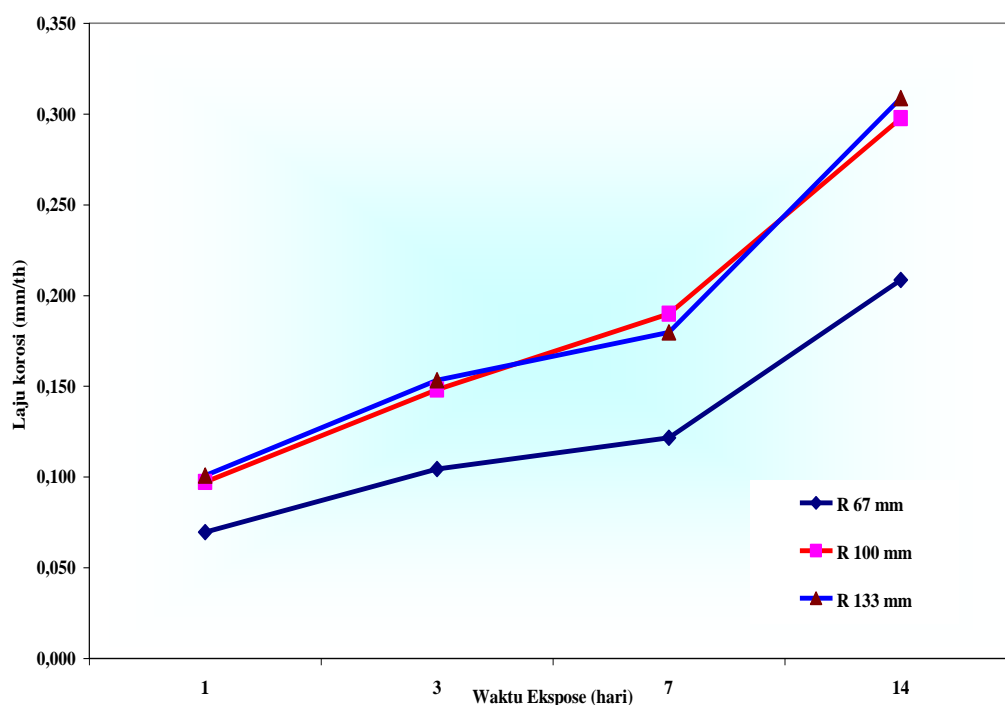
##### 4.1.2. Laju korosi spesimen *bending* dingin

Hasil perhitungan laju korosi untuk spesimen yang di bending dingin dapat dilihat dalam Tabel.4.1, berikut.

Tabel.4.1. laju korosi bending dingin.

Hari Ke	Spesimen <i>Bending</i> Dingin					
	R 67 mm		R 100 mm		R 133 mm	
	$\Delta W$	$C_R$	$\Delta W$	$C_R$	$\Delta W$	$C_R$
	(gram)	mm/tahun	(gram)	mm/tahun	(gram)	mm/tahun
0	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000
1	1,52	0,070	2,27	0,097	2,26	0,101
3	4,56	0,104	6,92	0,148	6,87	0,153
7	10,65	0,122	17,75	0,190	16,10	0,180
14	31,94	0,209	48,69	0,298	48,41	0,309
Rata-rata $C_R$ :		0,126		0,183		0,186

Laju korosi rata-rata spesimen bending dingin R.67 paling rendah (0,126 mm/tahun), dibanding spesimen bending dingin R.100 (0,183 mm/tahun) dan spesimen bending dingin R.133 (0,186 mm/tahun). Rendahnya laju korosi pada proses bending dingin R 67 dikarenakan pada proses bending R 67 mengalami proses tekanan yang paling besar, sehingga dengan tekanan yang besar tersebut memungkinkan struktur atom tertekan menjadi rapat dan meminimalisir adanya ruang kosong atau impuriti (material tidak murni) dalam struktur atom. Dengan susunan atom yang rapat tersebut memungkinkan dapat menghambat laju korosi dibandingkan dengan struktur atom yang lebih longgar (proses bending R100 dan R133) Laju korosi spesimen dapat dilihat di Gambar.4.1, berikut.



Gambar.4.1. Laju korosi bending dingin R.67, R.100 dan R.133.

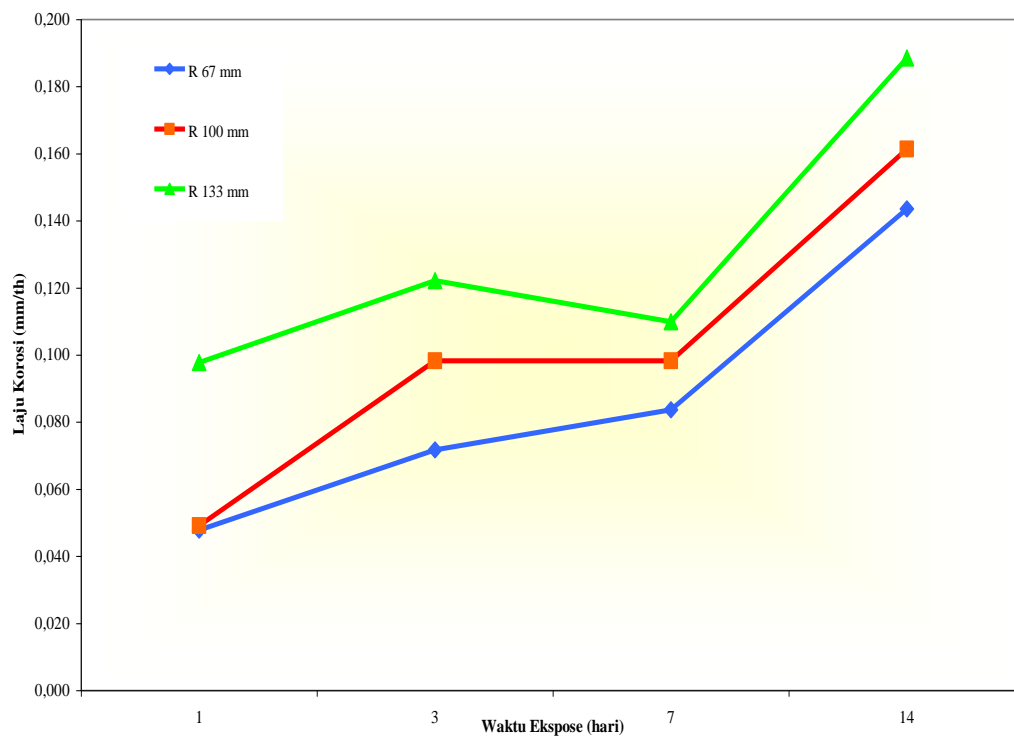
#### 4.1.3. Laju korosi spesimen *bending line heating* 600°C

Laju korosi rata-rata terendah adalah pada *bending line heating* 600°C R.67 (0,087 mm/tahun), kemudian R.100 (0,102 mm/tahun) dan R.133 (0,130 mm/tahun), hal ini dapat dilihat dalam Tabel.4.2, berikut.

Tabel.4.2 Laju korosi *bending line heating* 600°C.

Hari Ke	Spesimen <i>Bending Line Heating</i> 600° C					
	R 67 mm		R 100 mm		R 133 mm	
	$\Delta W$	$C_R$	$\Delta W$	$C_R$	$\Delta W$	$C_R$
	(gram)	mm/tahun	(gram)	mm/tahun	(gram)	mm/tahun
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	1,073	0,048	1,115	0,049	2,235	0,098
3	3,219	0,072	4,461	0,098	5,588	0,122
7	7,510	0,084	8,923	0,098	10,059	0,110
14	22,531	0,144	25,653	0,161	30,178	0,189
Rata-rata $C_R$		0,087		0,102		0,130

Laju korosi korosi *bending line heating* dengan pemanasan 600°C untuk spesimen dengan radius bending R.67, R 100 dan R.133. dapat dilihat dalam Gambar. 4.2, berikut.



Gambar.4.2. Laju korosi *bending line heating* 600°C : R.67, R.100 dan R.133

#### 4.1.4 Laju korosi spesimen *perlakuan line heating* R.67 (400°C – 850°C)

Penurunan berat akibat korosi pada spesimen yang mengalami *bending line heating* dengan suhu pemanasan 400°C sampai dengan 850°C, dapat dilihat dalam Tabel.4.3, berikut ini:

Tabel.4.3 Penurunan berat akibat korosi spesimen *bending line heating*

Hari Ke	<i>Bending Line Heating , R 67</i>				
	400 °C	500 °C	600 °C	750 °C	850 °C
	$\Delta W$	$\Delta W$	$\Delta W$	$\Delta W$	$\Delta W$
	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,75	1,12	1,06	1,06	1,09
3	5,25	4,47	3,18	4,24	4,37
7	12,25	12,29	7,43	11,67	12,02
14	36,76	35,75	22,28	33,96	34,95

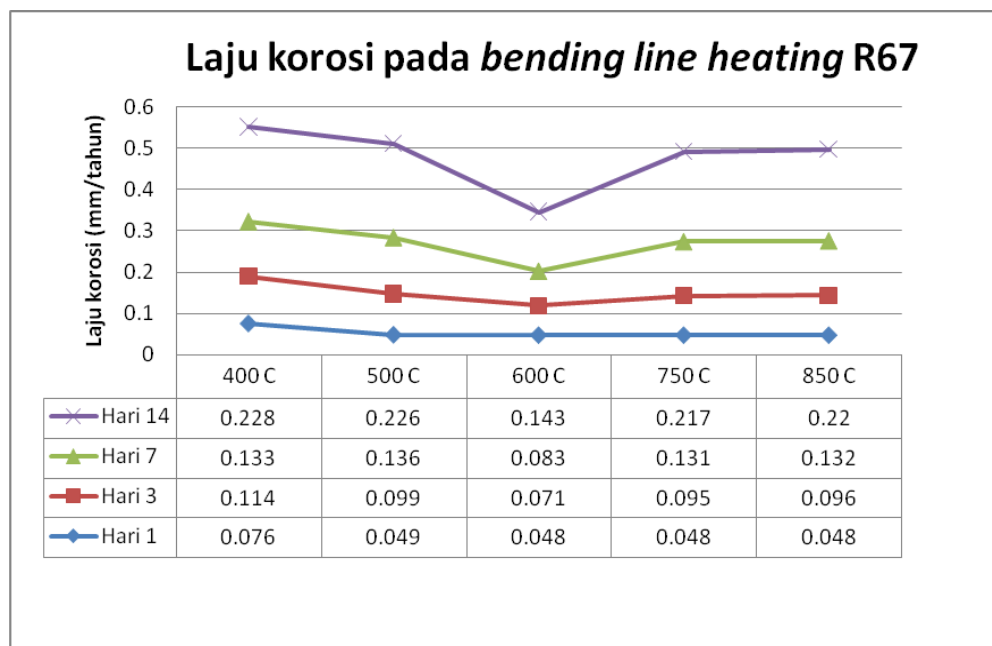
Laju korosi spesimen yang di *bending line heating* dengan radius R 67 dapat dilihat dalam Tabel.4.4, berikut ini.

Tabel.4.4. Laju korosi *bending line heating*

Hari Ke	<i>Bending Line Heating , R 67</i>				
	400 °C	500 °C	600 °C	750 °C	850 °C
	$C_R$	$C_R$	$C_R$	$C_R$	$C_R$
	mm/tahun	mm/tahun	mm/tahun	mm/tahun	mm/tahun
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,076	0,049	0,048	0,048	0,048
3	0,114	0,099	0,071	0,095	0,096
7	0,133	0,136	0,083	0,131	0,132
14	0,228	0,226	0,143	0,217	0,220
Rata-rata	0,138	0,127	0,086	0,123	0,124

Laju korosi rata-rata pada proses *bending line heating* R.67 seiring dengan kenaikan temperatur *line heating* menunjukkan arah grafik laju korosi yang menurun dan penurunan cenderung signifikan, akan tetapi setelah temperatur *line heating* diatas 600 °C laju korosi menunjukkan arah grafik laju korosi yang naik kembali. Kenaikan laju korosi yang terjadi pada temperatur *line heating* diatas 600 °C tidak begitu signifikan. Sehingga dari pengujian korosi pada *bending line heating* R.67 dapat disimpulkan bahwa pada temperatur *line heating* 600 °C diperoleh rata-rata laju korosi yang terendah (Gambar 4.3). Hal ini dimungkinkan bahwa pada temperatur 600 °C merupakan titik puncak pada material baja AISI E 2512 dalam proses penataan struktur atom akibat proses pemanasan. Dengan struktur atom yang tertata baik maka dapat menghambat laju korosi yang terjadi.





Gambar.4.3. Laju korosi spesimen R.67 *perlakuan line heating*  
(400 - 850°C)

#### 4.1.5. Laju korosi spesimen R.133 *perlakuan line heating* (400°C – 850°C)

Penurunan berat akibat korosi pada spesimen yang mengalami *bending line heating* dengan suhu pemanasan 400°C sampai dengan 850°C, dapat dilihat dalam Tabel.4.5, berikut ini.

Tabel.4.5. Penurunan berat akibat korosi spesimen *bending line heating*

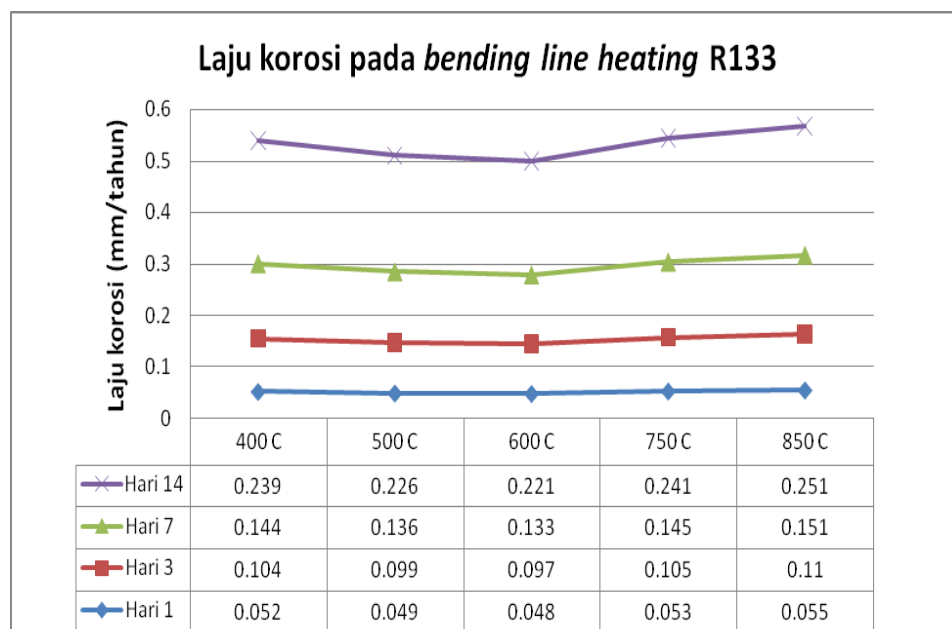
Hari Ke	<i>Bending Line Heating , R 133</i>				
	400 °C	500 °C	600 °C	750 °C	850 °C
	$\Delta W$	$\Delta W$	$\Delta W$	$\Delta W$	$\Delta W$
	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	1,099	1,062	1,042	1,121	1,187
3	4,398	4,248	4,170	4,483	4,749
7	12,093	11,681	11,466	12,328	13,060
14	35,181	33,982	33,357	35,865	37,992

Laju korosi spesimen yang di *bending line heating* dengan radius R.133 dapat dilihat dalam Tabel.4.6, berikut ini.

Tabel.4.6. Laju korosi R.133 perlakuan *line heating*

Hari Ke	<i>Bending Line Heating , R 133</i>				
	400 °C	500 °C	600 °C	750 °C	850 °C
	$C_R$	$C_R$	$C_R$	$C_R$	$C_R$
	mm/tahun	mm/tahun	mm/tahun	mm/tahun	mm/tahun
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,052	0,049	0,048	0,053	0,055
3	0,104	0,099	0,097	0,105	0,110
7	0,144	0,136	0,133	0,145	0,151
14	0,239	0,226	0,221	0,241	0,251
Rata-rata	0,135	0,127	0,125	0,136	0,142

Laju korosi rata-rata tertinggi spesimen *bending line heating* R.133 adalah pada pemanasan 850°C (0,142 mm/tahun) dan sedikit dibawahnya dengan pemanasan 750°C (0,136 mm/tahun) kemudian yang paling rendah adalah dengan pemanasan 600°C (0,125 mm/tahun). Hasil ini memperkuat pada hasil proses *bending line heating* R 67 bahwa pada temperatur 600 °C merupakan titik puncak pada material baja AISI E 2512 dalam proses penataan struktur atom akibat proses pemanasan. Dengan struktur atom yang tertata baik maka dapat menghambat laju korosi yang terjadi. Perbandingan suhu pemanasan pada perilaku korosi spesimen pelat baja dapat dilihat pada Gambar.4.4, berikut.

Gambar 4.4. Laju korosi spesimen R.133 perlakuan *bending line heating* (400-850°C)

#### 4.1.6. Perbandingan laju korosi spesimen pengujian celup

Laju korosi rata-rata spesimen yang dibending dingin adalah 0,165 mm/tahun (untuk R.67 : 0,126 mm/tahun, R.100 : 0,183 mm/tahun dan R.133 : 0,186 mm/tahun). Rendahnya laju korosi pada proses bending dingin R 67 dikarenakan pada proses bending R 67 mengalami proses tekanan yang paling besar, sehingga dengan tekanan yang besar tersebut memungkinkan struktur atom tertekan menjadi rapat dan meminimalisir adanya ruang kosong atau impuriti (material tidak murni) dalam struktur atom. Dengan susunan atom yang rapat tersebut memungkinkan dapat menghambat laju korosi dibandingkan dengan struktur atom yang lebih longgar (proses bending R100 dan R133)

Pada proses *bending line heating* laju korosi yang paling rendah adalah pada proses *line heating* dengan temperatur pemanasan 600 °C. Hal ini dimungkinkan bahwa pada temperatur 600 °C merupakan titik puncak pada material baja AISI E 2512 dalam proses penataan struktur atom akibat proses pemanasan. Dengan struktur atom yang tertata baik maka dapat menghambat laju korosi yang terjadi. Pada temperatur *bending line heating* pada R 67 menghasilkan laju korosi yang paling rendah.

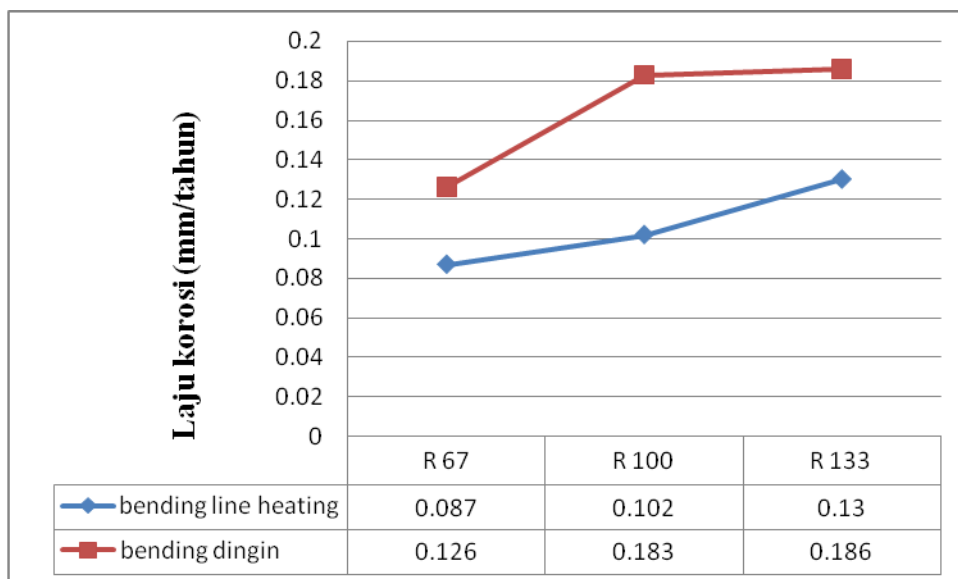
Dari dua proses *bending* diatas dapat dibandingkan laju korosi yang terjadi antara *bending line heating* dan *bending* dingin seperti pada Tabel 4.8 berikut.

Tabel.4.7. Laju korosi perlakuan *line heating* dengan bending dingin

Nilai Rata-rata	Perbandingan (spicement)					
	Spesimen <i>Bending</i>					
	<i>Line Heating 600°C</i>			Bending dingin		
	R 67	R 100	R 133	R 67	R 100	R 133
1	3	4	5	6	7	8
Laju Korosi	0,087	0,102	0,130	0,126	0,183	0,186

Dari Tabel 4.8 diatas dapat disimpulkan bahwa proses *bending line heating* mempunyai laju korosi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan proses *bending* dingin. Hal ini dikarenakan pada proses *bending line heating* efek dari pemanasan selain menghasilkan bentuk radius juga menghasilkan struktur atom yang lebih tertata. Sehingga hal ini berbeda dengan proses

bending dingin, dimana pada proses bending dingin bentuk lengkung atau radius yang dihasilkan tidak diikuti dengan bentuk struktur atom yang tertata.

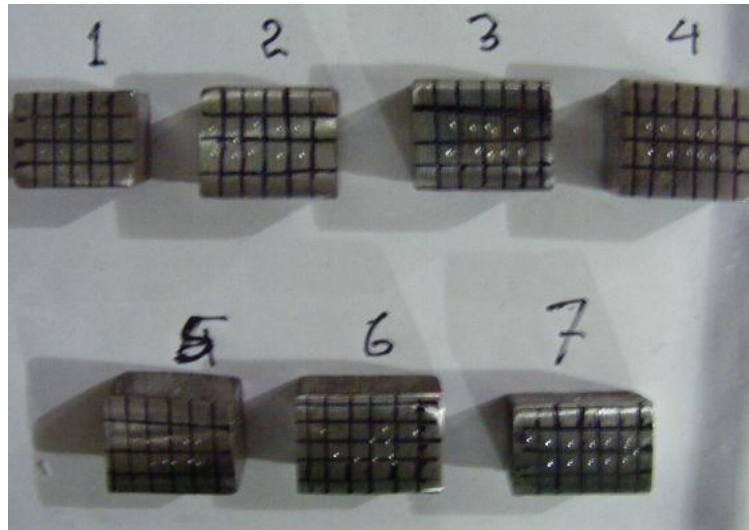


Gambar.4.5. Perbandingan antara *bending line heating* dan *bending dingin*

#### 4.2. Data dan Pembahasan Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan untuk menilai apakah pelat baja kapal dengan standart *grade A* (BKI) atau setara AISI-E2512 setelah di bending dingin dan *bending line heating* masih memiliki sifat mekanis yang di persyaratkan dalam kelayakan kapal untuk melaut.

Spesimen dibuat dengan ukuran 10 mm x 10 mm x 11 mm, setelah proses pemotongan di bersihkan dan diamplas. Kemudian spesimen ditempatkan pada ragam *Rockwell Hardness Test*, spesimen setelah pengujian kekerasan dapat dilihat pada gambar.4.6 , berikut.



Gambar.4.6. Spesimen setelah uji kekerasan (*Rockwell Hardness Test*).

Dengan melihat indikator pada mesin uji, maka diperoleh data hasil pengujian kekerasan seperti dalam Tabel.4.7, berikut.

Dalam menentukan nilai kekerasan menggunakan persamaan berikut

Deviasi ( $\delta HR$ ):

$$\delta HR = \sqrt{\frac{\sum (HR - \overline{HR})^2}{n(n-1)}}$$

Dimana :  $n$  = banyaknya percobaan

Nilai sesungguhnya ( $NS$ ) :

$$NS = \overline{HR} \pm \delta HR$$

Ralat Nisbi ( $RN$ ) :

$$RN = \frac{\delta HR}{\overline{HR}} \times 100\%$$

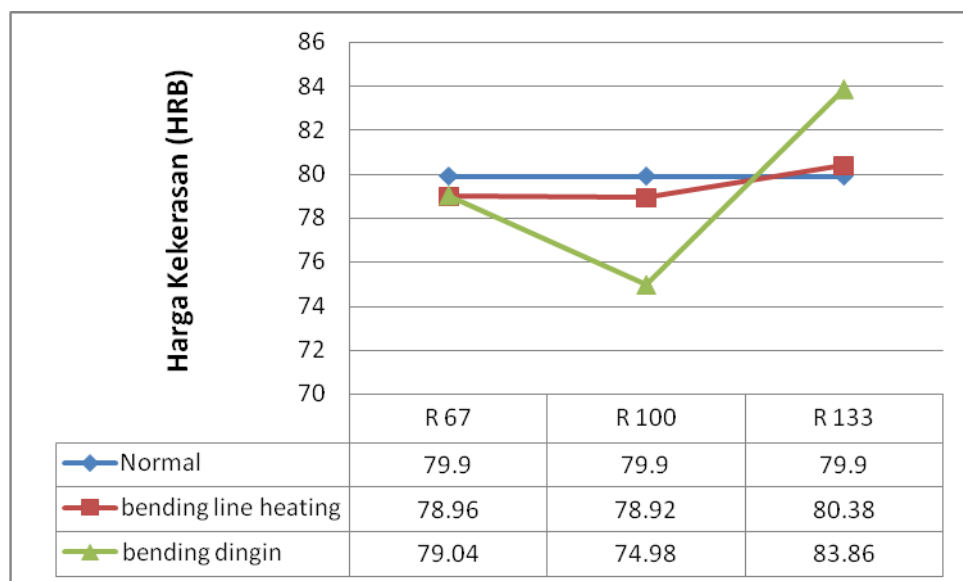
Keseksamaan ( $K$ )

$$K = \left( 1 - \frac{\delta HR}{\overline{HR}} \right) \times 100\%$$

Tabel.4.8. Hasil Uji Kekerasan (*Rockwell Hardness*).

No	Nilai HRB Untuk Benda Uji (spicement)							
	Normal	Spesimen <i>Bending</i>						
		<i>Line Heating</i>				Tanpa <i>Line Heating</i>		
		R 0	R 67	R 100	R 133	R 67	R 100	R 133
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	79,8	78,9	79,1	80,1	79,1	75,5	83,5	
2	80,2	78,9	78,9	79,9	79,8	74,8	83,6	
3	80,1	79,1	78,8	81	79,7	74,7	84,5	
4	79,9	79,0	79,3	80,5	78,1	75,1	83,9	
5	79,5	78,9	78,5	80,4	78,5	74,8	83,8	
Max	80,2	79,1	79,3	80,5	79,8	74,7	84,5	
Min	79,5	78,9	78,5	79,9	78,1	75,5	83,5	
$\overline{HR}$	79,9	78,96	78,92	80,38	79,04	74,98	83,86	
$\delta HR$	0,122	0,040	0,136	0,188	0,331	0,146	0,175	
$NS$	80,022	79,0	79,056	80,568	79,371	75,126	84,035	
$RN$	0,15	0,051	0,172	0,234	0,42	0,195	0,209	
$K$	99,85	99,95	99,83	99,77	99,58	99,80	99,79	

Perbandingan nilai kekerasan dapat dilihat dalam grafik pengujian kekerasan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Perbandingan nilai kekerasan spesimen uji bending dingin & Perlakuan *line heating*

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa pelat normal memiliki nilai kekerasan rata-rata 79,9 HRB. Pada proses *bending line heating* hasil pengujian kekerasan tertinggi didapat pada R133 yaitu 80,38 HRB sedangkan pada proses *bending* dingin kekerasan tertinggi didapat pada R 133 dengan nilai kekerasan 83,86 HRB.

Pada Gambar 4.7 jika diamati bahwa pada proses *bending line heating* dan *bending* dingin pada R 67 dan R 100 mempunyai nilai kekerasan dibawah nilai kekerasan material normal (dibawah 79.9 HRB). Hal ini dikarenakan pada proses *bending line heating* dan *bending* dingin pada R 67 dan R 100 kelengkungan yang dihasilkan lebih besar jika dibandingkan pada R133, sehingga sisi bagian luar mengalami beban tarik lebih besar. Akibat beban tarik tersebut menyebabkan ikatan antar atom merenggang dan bentuk butir menjadi pipih. Jika pengujian kekerasan dilakukan pada daerah ini maka hasilnya pasti lebih kecil dari kekerasan normalnya.

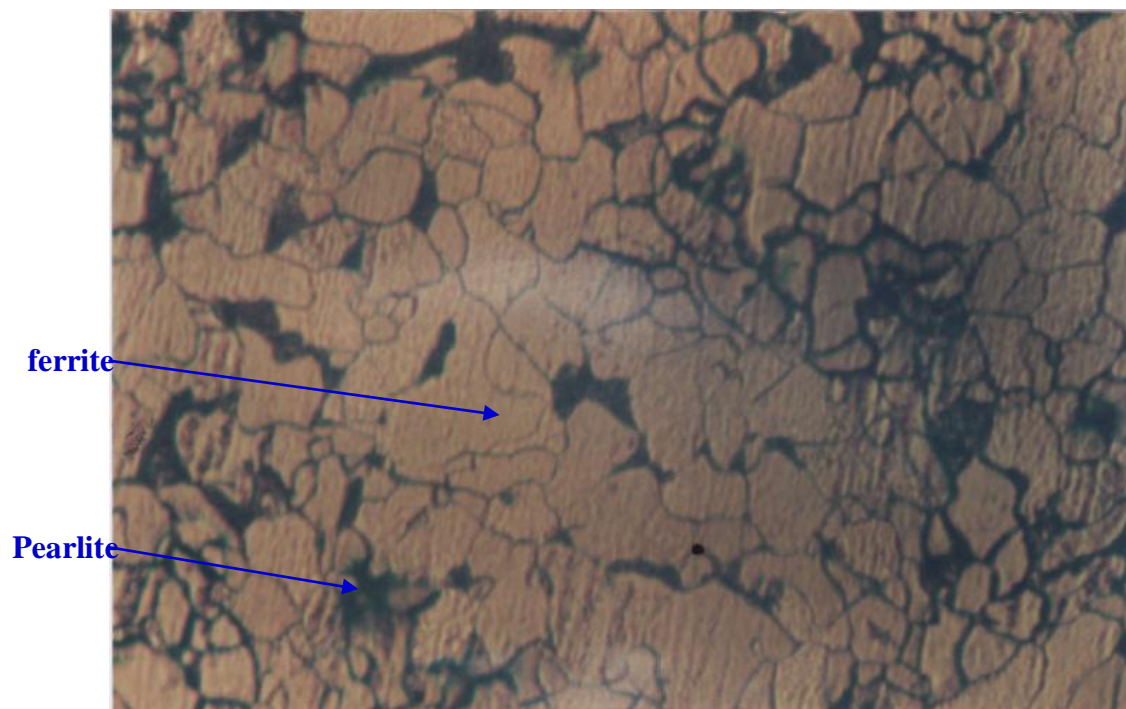
Pada gambar 4.7 juga dapat diamati bahwa proses *bending line heating* mempunyai kekerasan yang lebih stabil dibandingkan *bending* dingin pada R 67, R 100 dan R 133. Hal ini dikarenakan pemanasan yang terjadi dapat mengurangi efek akibat gaya tarik yang terjadi, sehingga struktur atom lebih cenderung setabil dibandingkan pada proses *bending* dingin.

### 4.3 Data dan Pembahasan Uji Struktur Mikro

Metalografi merupakan uji untuk memperoleh gambar yang menunjukkan struktur mikro logam dan paduannya, dengan metalografi dapat diketahui struktur logam dengan memperjelas batas-batas butir logam, Ada dua macam pemeriksaan struktur kristal yang biasa dilakukan yaitu pemeriksaan makro dan pemeriksaan mikro,

#### 4.3.1 Uji struktur mikro spesimen normal

Arah pengambilan gambar pada uji metalografi 10 – 0 – 5 , dengan jarak 0,5 mm dan pembesaran 200 X, dapat dilihat dalam Gambar 4.8 berikut:



Gambar 4.8 Hasil pengujian struktur mikro spesimen normal  
(perbesaran 200X)

Dari gambar 4.8 pengujian struktur mikro spesimen normal ini terlihat bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa *ferrit* dan *pearlite*. Dimana fasa *ferrit* berwarna terang dan *Pearlite* berwarna gelap. Pengujian struktur mikro pada spesimen normal menunjukkan bahwa *ferrit* lebih dominan jika dibandingkan fasa *Pearlite*.

Material AISI E2512 merupakan material karbon rendah dengan komposisi C sebesar 0,154 %. Untuk membuktikan hasil struktur mikro pada Gambar 4.8 dapat dilakukan perhitungan komposisi *pearlite* dan *ferrite* dengan persamaan berikut ini :

***Pearlite:***

$$W_p = \frac{T}{T+U} = \frac{Co - 0,022}{0,76 - 0,022} = \frac{0,14 - 0,022}{(0,14 - 0,022) + (0,76 - 0,14)} = 0,1599 = 15,99\%$$

***Ferrite:***

$$W_p = \frac{U}{T+U} = \frac{0,76 - Co}{0,76 - 0,022} = \frac{0,76 - 0,14}{(0,14 - 0,022) + (0,76 - 0,14)} = 0,8401 = 84,01\%$$

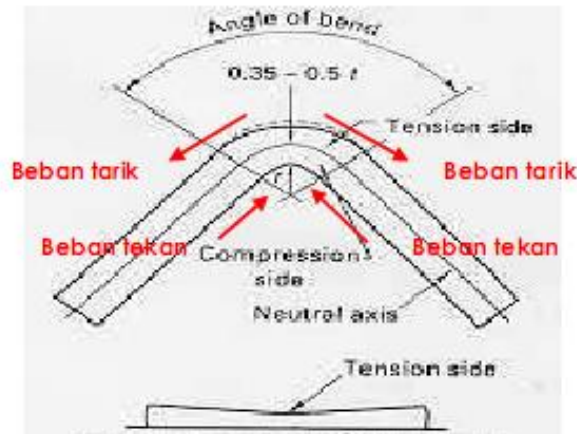


Jadi pada material baja AISI E2512 persentase *ferrite* = 84,01 % dan *pearlite* = 15,99%, Jika dibandingkan dengan hasil struktur mikro, menunjukkan bahwa hasil struktur mikro memiliki % *ferrite* yang lebih banyak dibandingkan % *pearlite*.

#### 4.3.2 Uji struktur mikro spesimen bending dingin

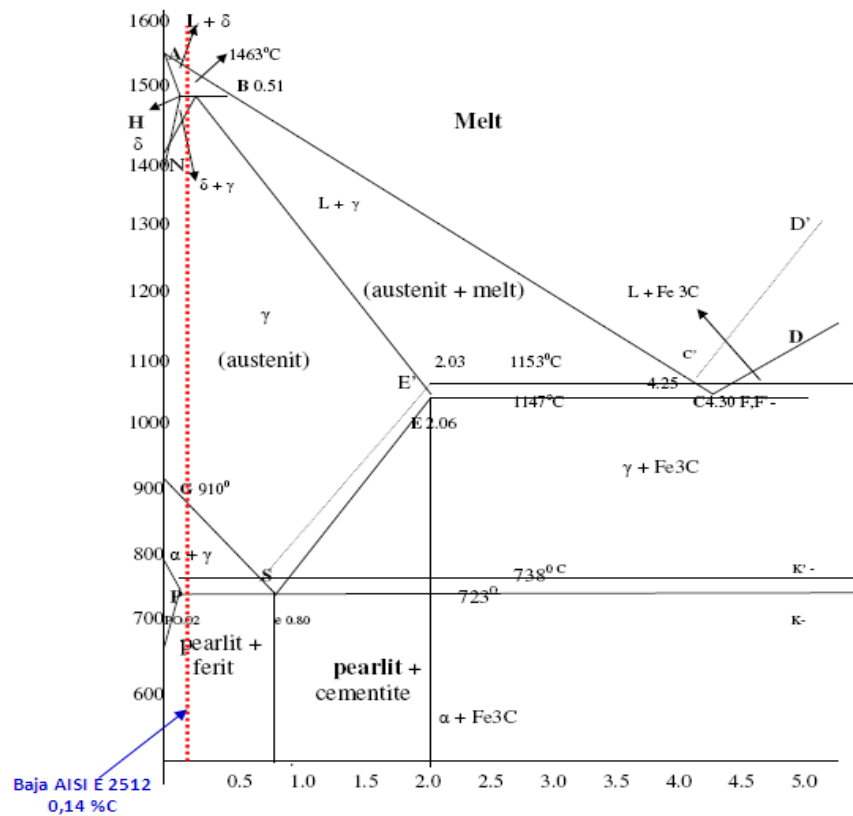
Bending adalah proses deformasi secara plastik dari logam terhadap sumbu linier dengan hanya sedikit atau hampir tidak mengalami perubahan perubahan luas permukaan, Bending menyebabkan logam pada sisi luar sumbu netral mengalami tarikan, sedangkan pada sisi lainnya mengalami tekanan,

Proses bending pada plat kapal dalam penelitian ini adalah *angle bending*, *Angle bending* memungkinkan untuk membuat lengkungan dengan sudut sampai  $\pm 1500$  pada lembaran logam, Proses bending dapat dilihat dalam gambar 4.9 berikut ini:



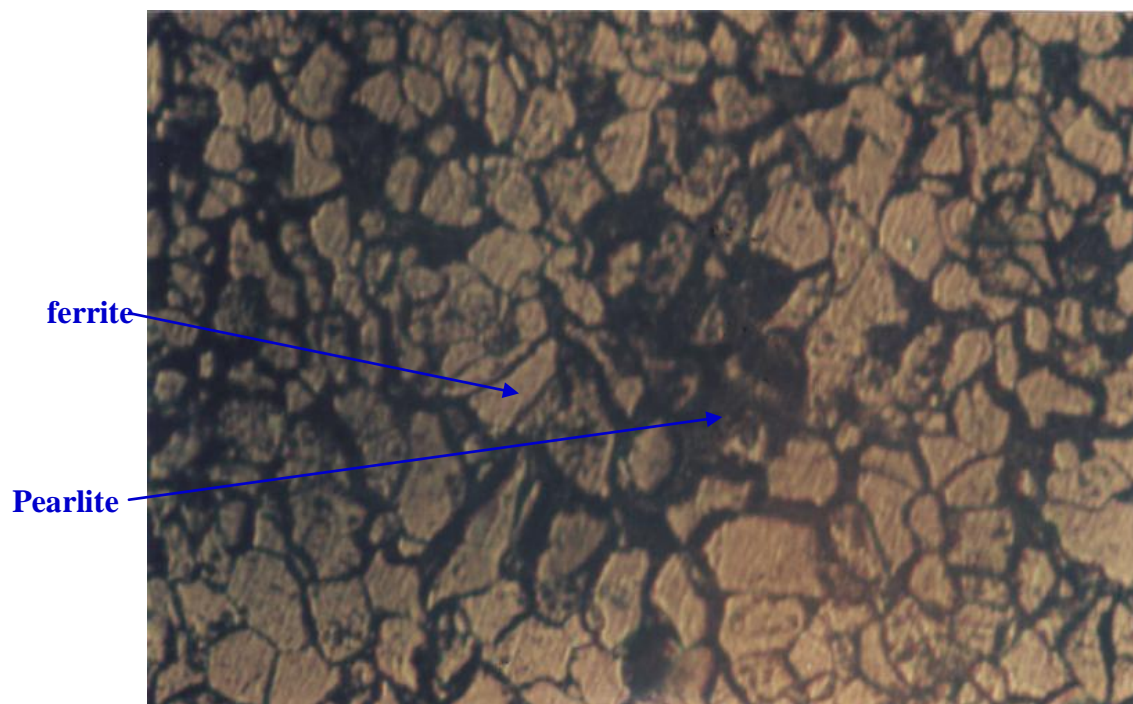
Gambar 4.9 Proses bending

Pada proses bending tidak terjadi perubahan fasa, artinya fasa setelah baja AISI E2512 mengalami proses bending dan sebelum adalah sama yaitu fasa *ferrit* dan *Pearlite* (Gambar 4.10). Hal ini terlihat dari hasil pengamatan uji struktur mikro yang telah dilakukan, baik pada proses bending untuk R 67, R100 dan R 133.

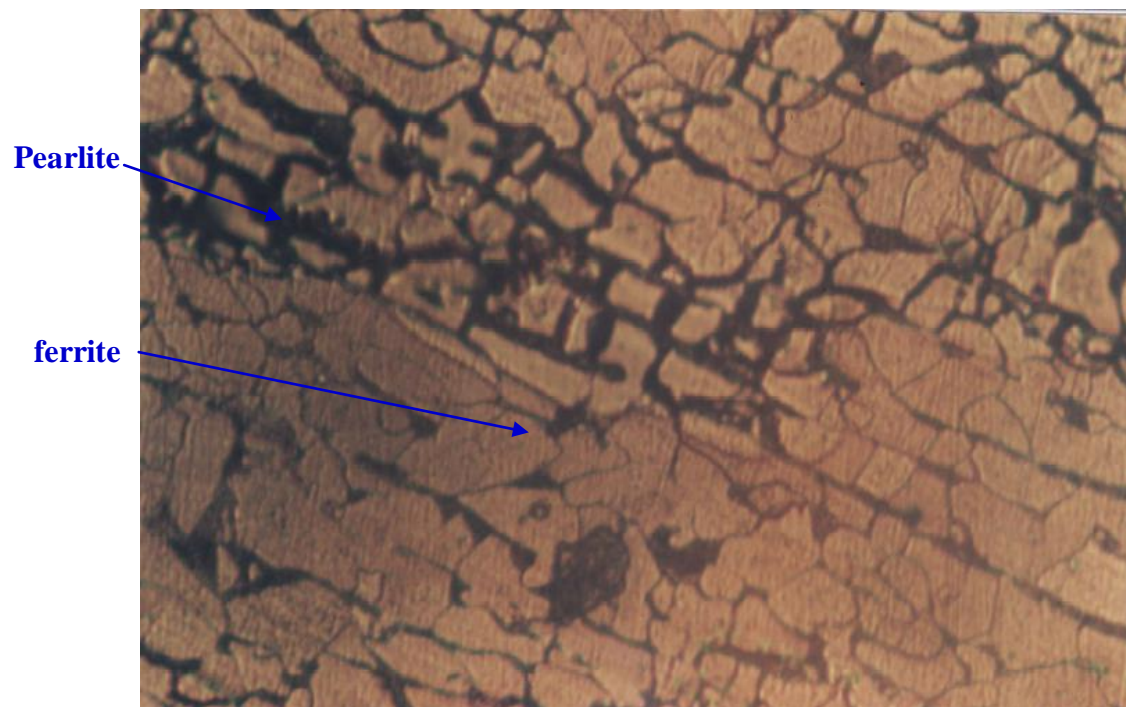


Gambar 4.10 Diagram fasa baja AISI E 2512

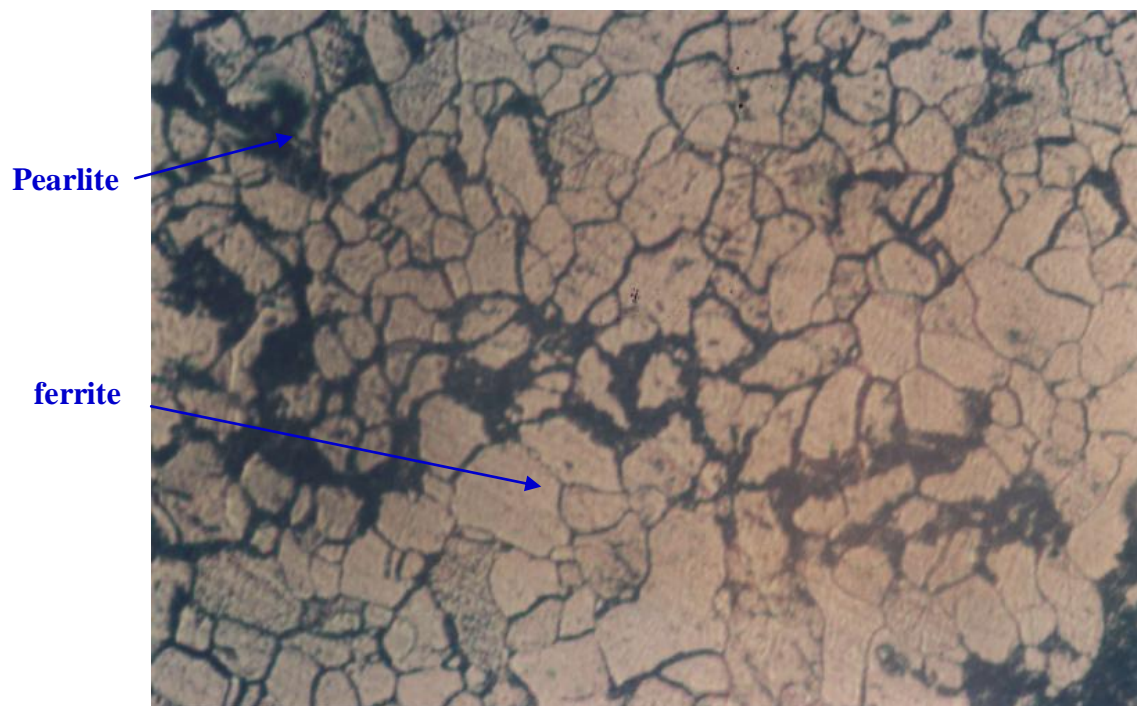
Hasil pengujian struktur mikro baja AISI E2512 pada proses *bending* dingin dengan radiau 67, 100 dan 133 dapat dilihat pada Gambar 4.11, 4.12, dan 4.13 berikut ini:



Gambar 4.11 Hasil pengujian struktur mikro spesimen *bending* dingin R 67 (perbesaran 200X)



Gambar 4.12 Hasil pengujian struktur mikro spesimen *bending* dingin R 100  
(perbesaran 200X)



Gambar 4.13 Hasil pengujian struktur mikro spesimen *bending* dingin R 133  
(perbesaran 200X)

Pada proses bending sisi luar sumbu netral mengalami beban tarikan dan sisi dalam mengalami beban tekan maka, akan berpengaruh terhadap bentuk butir hasil proses bending. Dimana pada sisi luar bentuk butir menjadi lebih lonjong memanjang karena beban tarik dan sisi bagian dalam bentuk kristalnya menjadi termampatkan karena beban tekan.

Pada Gambar struktur mikro 4.11, 4.12 dan 4.13 diambil pada sisi bagian luar atau sisi yang menerima beban tarik, sehingga jika dibandingkan dengan struktur mikro pada Gambar 4.8 terlihat ukuran butir lebih pipih dan ukurannya menjadi besar. Bentuk yang demikian ini adalah pengaruh proses *bending* dingin. Pada *bending* dingin R 67 (Gambar 4.11) menunjukkan bentuk butir yang terlalu renggang jika dibanding pada *bending* dingin R 100 (Gambar 4.12) dan R 133 (Gambar 4.13). Hal ini membuktikan pada R 67 karena bentuk yang sangat melengkung maka beban tarik pada sisi bagian luar lebih besar, beban tarik inilah yang menyebabkan bentuk butir yang renggang. Akan tetapi pada R67 sisi bagian dalam akan mengalami beban tekan yang besar akibatnya bentuk butir lebih mampat.

Pada bending dingin R 100 dan R133 menunjukkan bentuk butir yang masih rapat karena bentuk lengkung yang dibuat tidak sebesar R 67, sehingga beban tarik yang diterima sisi luar tidak sebesar R 67. Sehingga pada pengujian kekerasan pada sisi bagian luar untuk *bending* dingin pada R 133 mempunyai harga kekerasan terbesar. Akan tetapi hasil pengujian laju korosi untuk R 133 dan R100 (Gambar 4.5) mempunyai laju korosi tertinggi karena jika dibandingkan R67 beban tekan yang diterima lebih kecil. Beban tekan yang terjadi pada proses *bending* dingin dapat memampatkan butir dan struktur atom, sehingga dapat menghambat laju korosi.

#### 4.3.3 Uji struktur mikro spesimen *bending line heating*

Sebuah pelat baja dipanaskan sepanjang garis lurus dengan brander pemanas maka akan terjadi lekukan kecil sepanjang garis tersebut, Bentuk-bentuk lengkung yang diperoleh dengan cara pemanasan garis sama halnya



apabila pelat dilengkungkan dengan cara ditekan atau dirol, kecuali akan terjadi proses penyusutan akibat proses pemanasan dan pendinginan,

Pada penelitian ini temperatur yang digunakan untuk parameter *line heating* adalah 400 °C, 500 °C, 600 °C, 750 °C dan 850 °C. Pengerjaan logam AISI E 2512 pada temperatur 400 °C, 500 °C, 600 °C, 750 °C tersebut termasuk pengerjaan dingin, sedangkan pengerjaan pada temperatur 850 °C termasuk pengerjaan panas. Hal ini dikarenakan pada AISI E 2512 dengan temperatur cair (*melting point*) pada temperatur 1550 °C = 1823 °K terkristalisasi pada  $= 0,6 \times 1823 = 1093,8 \text{ K}$  (820,8 °C).

Berdasar pada Gambar diagram fasa Fe – C Gambar 4.14, dapat disimpulkan bahwa dengan pemanasan 400 °C, 500 °C, dan 600 °C memiliki fasa yang sama yaitu *ferrit* dan *pearlite*. Sedangkan pada temperatur pemanasan 750 °C dan 850 °C terjadi perubahan fasa ferit + Austenit ( $\alpha + \gamma$ ).

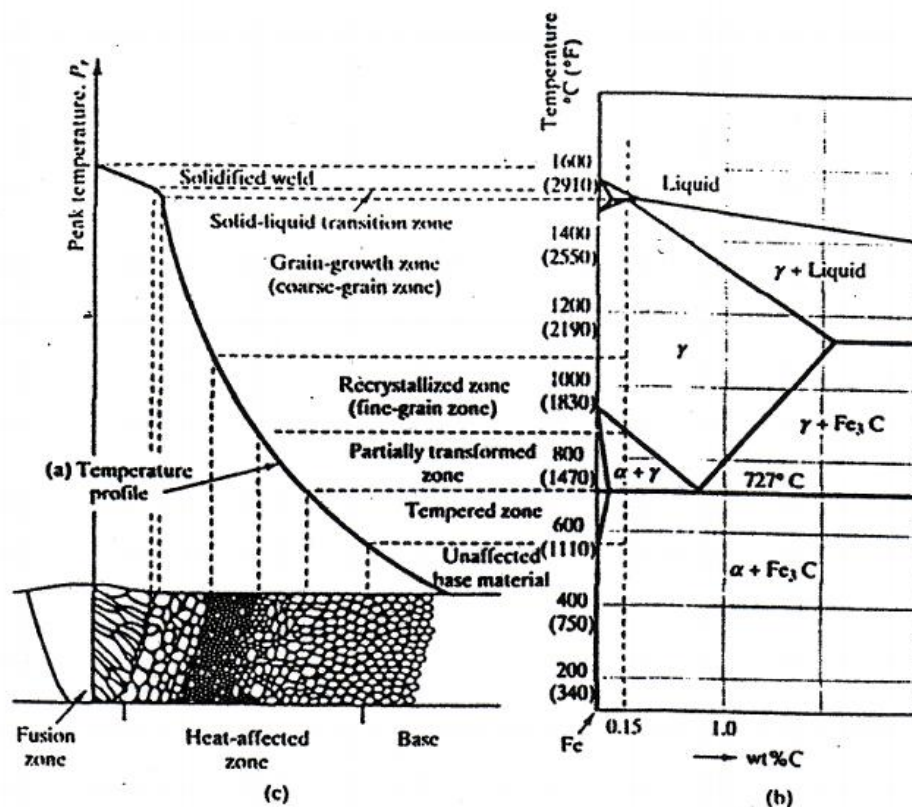
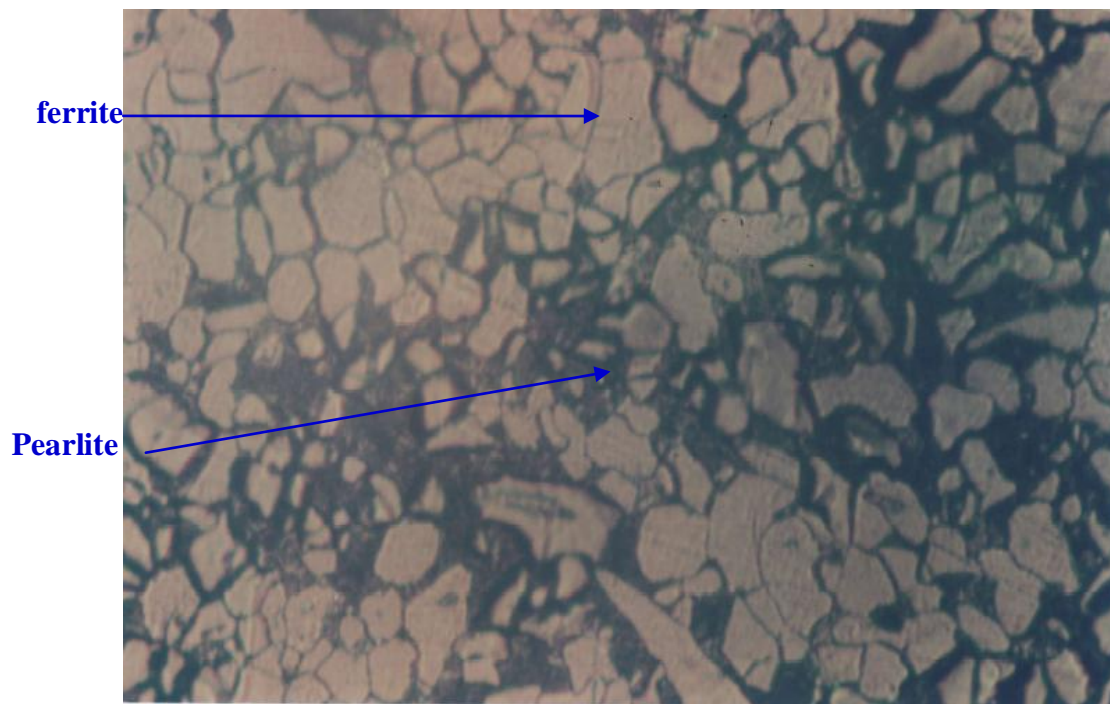


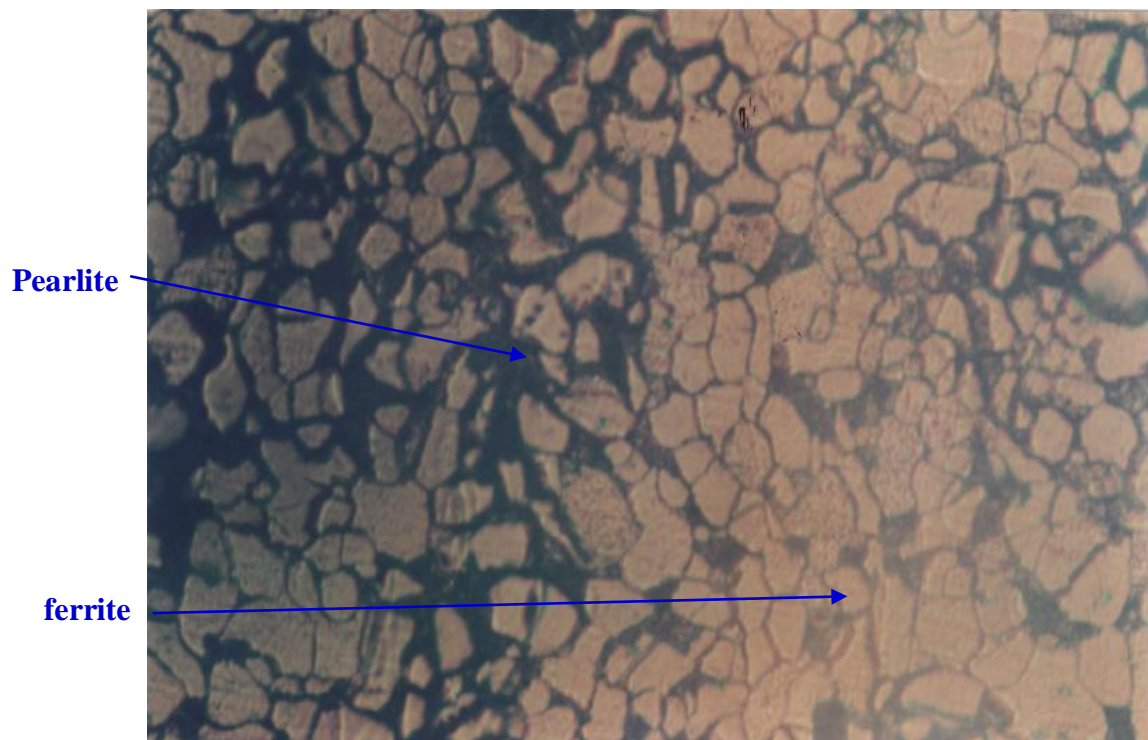
Fig. 12-7 (a) Schematic temperature profile in base material showing the ranges of temperature where different phases were obtained [from phase diagram (b)] and transformed to the different microstructures in (c) for a 0.15% C steel.

Gambar 4.14 Diagram fasa AISI E 2512

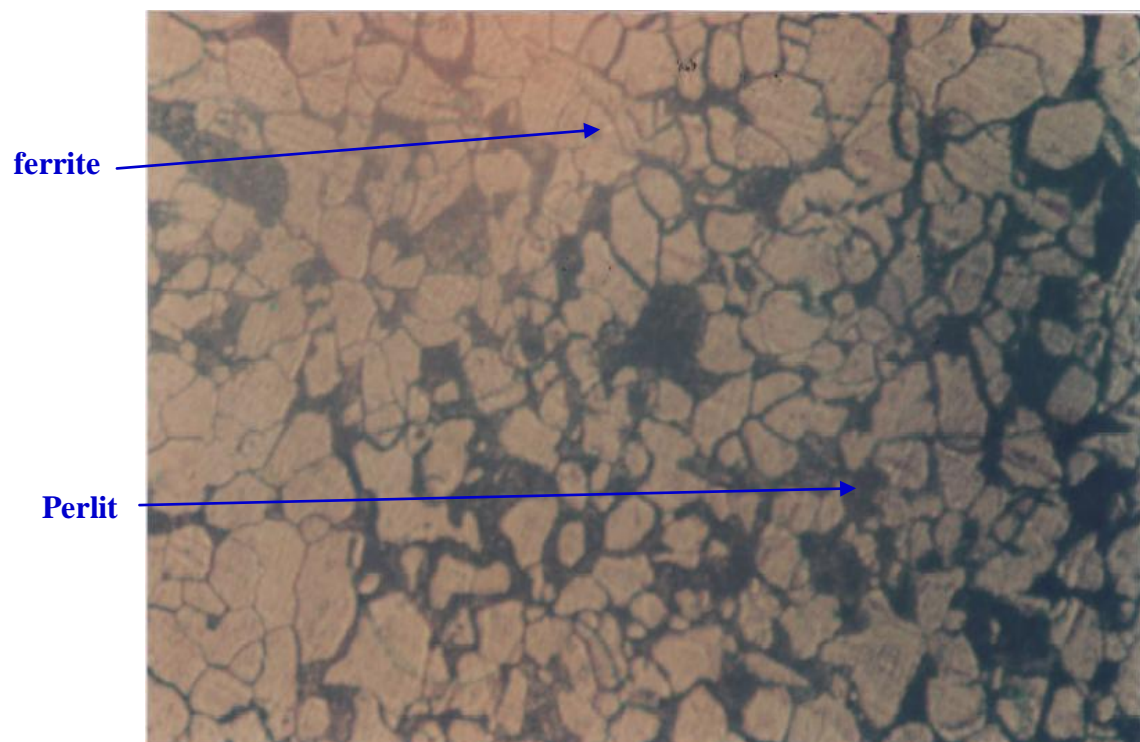
Seperti halnya pada proses *bending* dingin, pada proses *bending line heating* akibat pemanasan dan pendinginan menyebabkan perubahan bentuk dan ukuran butir. Perbedaan ukuran butir juga terjadi pada sisi luar dan dalam pada R 67, R 100 dan R 133 baik pada temperatur 400 °C, 500 °C, 600 °C, 750 °C dan 850 °C. Pada pengamatan struktur mikro ini bagian yang dilihat adalah sisi bagian luar. Adapaun gambar hasil pengamatan struktur mikro dapat dilihat seperti pada Gambar 4.15, 4.16 dan 4.17 berikut ini:



Gambar 4.15 Hasil pengujian struktur mikro spesimen *bending line heating* R 67 (perbesaran 200X)



Gambar 4.16 Hasil pengujian struktur mikro spesimen *bending line heating*  
R 100 (perbesaran 200X)



Gambar 4.17 Hasil pengujian struktur mikro spesimen *bending line heating*  
R 133 (perbesaran 200X)

Seperti halnya pada proses *bending dingin*, proses *bending line heating* sisi luar sumbu netral mengalami beban tarikan dan sisi dalam mengalami beban tekan maka, akan berpengaruh terhadap bentuk butir hasil proses bending. Dimana pada sisi luar bentuk butir menjadi lebih lonjong memanjang karena beban tarik dan sisi bagian dalam bentuk kristalnya menjadi termampatkan karena beban tekan. Pada Gambar struktur mikro 4.15, 4.16 dan 4.17 diambil pada sisi bagian luar atau sisi yang menerima beban tarik, sehingga jika dibandingkan dengan struktur mikro pada Gambar 4.8 terlihat ukuran butir lebih pipih dan ukurannya menjadi besar. Bentuk yang demikian ini adalah pengaruh proses *bending line heating*.

Pada *bending line heating* R 67 (Gambar 4.15) menunjukkan bentuk butir yang terlalu renggang jika dibanding pada *bending dingin* R 100 (Gambar 4.12) dan R 133 (Gambar 4.13). Hal ini membuktikan pada R 67 karena bentuk yang sangat melengkung maka beban tarik pada sisi bagian luar lebih besar, beban tarik inilah yang menyebabkan bentuk butir yang renggang. Akan tetapi pada R67 sisi bagian dalam akan mengalami beban tekan yang besar akibatnya bentuk butir lebih mampat. Pada *bending line heating* R 100 dan R133 menunjukkan bentuk butir yang masih rapat karena bentuk lengkung yang dibuat tidak sebesar R 67, sehingga beban tarik yang diterima sisi luar tidak sebesar R 67. Sehingga pada pengujian kekerasan pada sisi bagian luar untuk *bending line heating* pada R 133 mempunyai harga kekerasan terbesar. Akan tetapi hasil pengujian laju korosi untuk R 133 dan R100 (Gambar 4.5) mempunyai laju korosi tertinggi karena jika dibandingkan R67 beban tekan yang diterima lebih kecil. Beban tekan yang terjadi pada proses *bending line heating* dapat memampatkan butir dan struktur atom, sehingga dapat menghambat laju korosi.

Proses *bending line heating* mempunyai struktur mikro yang lebih tertata jika dibandingkan dengan *bending dingin*. Hal ini dikarenakan proses pemanasan pada *bending line heating* selain mampu membentuk plat baja AISI E 2512 menjadi bentuk lengkung juga memperbaiki struktur atom yang berubah saat terjadi proses *bending*.



Pemuaian dan pengkerutan yang terjadi untuk setiap proses *line heating* dengan suhu 400, 500, 600, 750, dan 850, dapat dilihat dalam Tabel 4.9 berikut ini:

Tabel 4.9 Perpanjang spesimen setelah di bending *line heating* secara teori,

Suhu	$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha * \Delta T$	$l_0$	$\Delta l$	$l_t = l_0 + \Delta l$
400	$= 12,5 \cdot 10^{-6} \times (400-30)$ $= 4,6998 \cdot 10^{-3}$	300	$\Delta l = 300 \times 4,6998 \cdot 10^{-3}$ $= 1,41 \text{ mm}$	$l_t = 300 + 1,41$ $= 301,41 \text{ mm}$
500	$= 12,5 \cdot 10^{-6} \times (500-30)$ $= 5,875 \cdot 10^{-3}$	300	$\Delta l = 300 \times 5,875 \cdot 10^{-3}$ $= 1,7625 \text{ mm}$	$l_t = 300 + 1,76$ $= 301,76 \text{ mm}$
600	$= 12,5 \cdot 10^{-6} \times (600-30)$ $= 7,125 \cdot 10^{-3}$	300	$\Delta l = 300 \times 7,125 \cdot 10^{-3}$ $= 2,1375 \text{ mm}$	$l_t = 300 + 2,137$ $= 302,137 \text{ mm}$
750	$= 12,5 \cdot 10^{-6} \times (750-30)$ $= 9 \cdot 10^{-3}$	300	$\Delta l = 300 \times 9 \cdot 10^{-3}$ $= 2,7 \text{ mm}$	$l_t = 300 + 2,7$ $= 302,7 \text{ mm}$
850	$= 12,5 \cdot 10^{-6} \times (850-30)$ $= 0,01025$	300	$\Delta l = 300 \times 0,01025$ $= 3,075 \text{ mm}$	$l_t = 300 + 3,075$ $= 303,075 \text{ mm}$

Perubahan panjang spesimen berdasarkan data hasil penelitian dapat dilihat dalam tabel 4.10 berikut ini:

Tabel 4.10 Perubahan panjang bending perlakuan *line heating* pada R,67, pada suhu 400°C – 850°C,

Suhu	Panjang luar (mm)	Panjang sisi luar (mm)	Panjang sisi dalam (mm)
400	300	310	280
500	300	310	280
600	300	310	280
750	300	310	280
850	300	310	280

R67 Suhu	Pengkerutan (mm)	Pemuaian (mm)	Pengkerutan (%)	Pemuaian (%)
400	20,0	10,00	6,67	3,33
500	20,0	10,00	6,67	3,33
600	20,0	10,00	6,67	3,33
750	20,0	10,00	6,67	3,33
850	20,0	10,00	6,67	3,33

Tabel 4.11 Perubahan panjang bending perlakuan *line heating* pada R133, pada suhu 400°C – 850°C,

Suhu	Panjang luar (mm)	Panjang sisi luar (mm)	Panjang sisi dalam (mm)
400	300	310	285
500	300	310	285
600	300	310	285
750	300	310	285
850	300	310	285

R133 Suhu	Pengkerutan (mm)	Pemuaiian (mm)	Pengkerutan (%)	Pemuaiian (%)
400	15,00	10,00	5,00	3,33
500	15,00	10,00	5,00	3,33
600	15,00	10,00	5,00	3,33
750	15,00	10,00	5,00	3,33
850	15,00	10,00	5,00	3,33

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Analisa pengaruh *bending* pelat baja baik untuk perlakuan *bending* dingin maupun *bending line heating* dengan menggunakan berbagai temperatur, terhadap kerusakan pelat baja akibat korosi, serta perubahan sifat mekanis yaitu tingkat kekerasan plat baja, yang dapat juga dilihat dari perubahan struktur mikronya maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pada proses *bending line heating* dan *bending* dingin pada R 67 dan R 100 mempunyai nilai kekerasan dibawah nilai kekerasan material normal (dibawah 79.9 HRB). Hal ini dikarenakan pada proses *bending line heating* dan *bending* dingin pada R 67 dan R 100 kelengkungan yang dihasilkan lebih besar jika dibandingkan pada R133, sehingga sisi bagian luar mengalami beban tarik lebih besar.
2. Spesimen pelat baja yang *dibending line heating* R 67 dengan temperatur pemanasan 600°C memiliki laju korosi rata-rata paling rendah yaitu 0,086 mm/tahun, laju korosi paling tinggi spesimen yang dilakukan bending dingin R 133 yaitu 0,186 mm/tahun, Perlakuan *line heating* dengan suhu pemanasan 600 °C lebih tahan terhadap korosi,
3. Pelat baja normal memiliki struktur fasa bersifat *pearlite* dan *ferrite*, dimana *ferrite* lebih dominan dari pada *pearlite*, Bending dengan proses *line heating* menggunakan pemanasan 400 °C, 500 °C, dan 600 °C memiliki fasa yang sama yaitu *pearlite* + *ferrite*, Sedangkan pada temperatur pemanasan 750 °C dan 850 °C terjadi perubahan fasa *ferrite* + *Austenite* (  $\alpha + \gamma$  ), perlakuan *line heating* akan merubah kandungan *ferrite*, apabila dilakukan dengan temperatur yang tinggi lebih dari 700°C, Pada proses bending dingin R 67 struktur *ferrite* tidak terlalu besar dibandingkan dengan *pearlite* yang hampir sama dengan keadaan normal, bending dingin R 100 struktur *ferrite*nya bergumpal kecil – kecil, bending dingin R 133 struktur *ferrite* sangat besar, serta *pearlite* yang terlihat menonjol dan *bainite* kasar, dominasi *ferrite* menyebabkan

material ini bersifat lunak dan ulet, Proses *line heating* akibat pemanasan dan pendinginan menyebabkan perubahan bentuk dan ukuran butir, Perbedaan ukuran butir juga terjadi pada sisi luar dan dalam pada R67, R100 dan R133, Struktur mikro pelat baja yang *dibending line heating* dengan radius R67, memiliki struktur *ferrite* kecil, *bending line heating* R100, struktur *ferrite* dan *pearlite* merata, *bending line heating* R133, struktur *ferrite* dan *pearlite* tidak terlalu merata. Suhu pemanasan pada *line heating* belum cukup untuk memecah struktur *ferrite* dan proses pendinginannya belum cukup membuat *ferrite* merapat sempurna,

## 5,2, Saran

Proses bending pelat baja lambung kapal sebaiknya dilakukan dengan *bending line heating* dengan suhu 600°C, dan pada suhu ini dapat menghambat laju korosi dibandingkan suhu pemanasan lainnya,

## DAFTAR PUSTAKA

- Anggono, Juliana, Citro, Soejono, dan Palapessy, Victor Rizal, 2000, *Studi Perbandingan Kinerja Anoda Korban Paduan Aluminium dengan Paduan Seng dalam Lingkungan Air Laut*, Jurnal Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra, Surabaya, Volume 2 Nomor 1, halaman 89 – 99,
- American Bureau of Shipping (ABS), 2007, *Guidance Notes On The Inspection, Maintenance and Application of Marine Coating System, Third Edition*, ABS, USA
- ASM International, (2004) "ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams",
- ASM International, (2004) "ASM Handbook, Volume 9, Metallography and Microstructures",
- Athanasius P, Bayuseno, 2009, "Pengujian Peretakan Korosi Tegangan Baja Stainless AISI 420 Menggunakan Model C-Ring", MTM, PPs-Undip, Semarang,
- Azhari Sastranegara, "Menggenal Uji Tarik dan Sifat-Sifat Logam" Teknik Mesin, UI,
- Badaruddin, M., Sugiyanto, (2005), "Efek Shot Peening Terhadap Retak Tegang (SCC) Baja karbon Rendah dalam Lingkungan Air laut", Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, Lampung,
- Benjamin D Craig, (2006) "Corrosion Prevention and Control : A Program Management Guide for Selecting Materials", Advanced Material, Manufacturing, and Testing Information Analysis Centre (AMMTIAC)
- Biro Klasifikasi Indonesia, PT, 2004, *Regulator for the Corrosion and Coating System, Edition 2004*, BKI, Jakarta
- Biro Klasifikasi Indonesia, PT., 2006, *Rules for The Classification and Construction of Seagoing Steel Ships, Volume II, Rules For Hull, Edition 2006*, BKI, Jakarta

- Callister Jr, William, D, (1994), "*Material Science And Engineering*", 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey,
- Chirillo, L, D, (1982), "*Line Heating*", US Department of Transportation,
- Furunaka Jica SV, (2002), "*Buku Pedoman untuk Firing*", Palembang, Indonesia,
- Jang, D,C,, Moon, S,C,, Ko, D,E,, (2007), "*Acquisition of Line Heating Information for Automatic Plate Forming*", Seoul National University, Korea
- Lunarska, E., Nikiforow, K., (2003), "*Improving the Resistance to Stress Corrosion Cracking and to Hydrogen Embrittlement of Bainite High Strength Steel*", Institute of physical Chemistry of the Polish Academy of Sciences, Poland
- Meilinda Nurbanasari,"*Pengaruh Temperatur dan Reduksi Ketebalan Terhadap Kekerasan dan Laju Korosi AISI 321 Pada Larutan 3,5% NaCl*", Teknik Mesin, ITB,
- Musalam, I., Lukman, (2002), "*Pengaruh Inhibitor Kromat Terhadap Korosi Retak Tegang Baja Tahan Karat SUS 316 di dalam Media HCl 0,82 M*", Telaah Volume 23, Tangerang,
- Pattee, H, E., Evans R, M., Monroe R, E., Battelle, (1962), "*Flame Straightening and Its Effect on Base Metal Properties*", Memorial Institute, Ohio,
- Pat L Manganon, 1999, "*International Edition The Principle of Material Selection for Engineering Design*", Florida Institute of Technology, Meulbourne, Florida,
- Pribadi, T,W, dan Hendropasetyo, W,, (1997), "*Pengaruh Proses Pembentukan Cara Panas (Flame Heating Technique) pada Kekuatan Mekanis Pelat Baja Kelas A-BKI Produksi Krakatau Steel*", Jurusan Teknik Perkapalan, FT, Kelautan – ITS, Surabaya, Indonesia,

- Raymond A Higgins, (1999), "*Engineering Metallurgy, Part I, Applied Physical Metallurgy*", Six Edition, Arnold, London,
- Sheir, LL, PhD, "Corrosion Volume 2, Corrosion Control", Butterworth Heinemann,
- Stewart, J, P, (1987), "*An introduction to Flame Straightening Techniques*", Metal Construction,
- Tretheway, KR, dan Chamberlin, J,, (1991), "*Korosi Untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*", terjemahan Alex Tri Kantjono Widodo, PT, Gramedia Utama, Jakarta,
- Triwilawandio W,(1997), "*Pengaruh Proses Pembentukan Cara Panas (Flame Heating Technique) pada Kekuatan Mekanis Pelat Baja Kelas A-BKI Produksi Krakatau Steel*", FTK-ITS,
- Tuper, 2002, "*In trodution to Naval Architrecture*", Butterworth Heinemann,
- Wiryosumarto, Harsono, (2000), "*Teknologi Pengelasan Logam*", PT Pradnya Paramita, Jakarta
- Zakharov, B, (1962), "*Heat Treatment of Metals*", Peace Publisher, Moscow, 2<sup>nd</sup> Printing,